DIE KÖRPERLICHEN ÄUSSERUNGEN PSYCHISCHER ZUSTÄNDE.

VON

DR. ALFR. LEHMANN,

DIREKTOR DES PSYCHOPHYSISCHEN LABORATORIUMS AN DER UNIVERSITÄT KOPENHAGEN.

ZWEITER TEIL.

DIE PHYSISCHEN ÄQUIVALENTE DER BEWUSSTSEINS-ERSCHEINUNGEN.

MIT 30 IN ZINK GEÄTZTEN TAFELN.

NACH DEM MANUSKRIPTE DES VERFASSERS ÜBERSETZT

VON

F. BENDIXEN.

LEIPZIG,

O. R. REISLAND.

1901.

DIE

PHYSISCHEN ÄQUIVALENTE DER BEWUSSTSEINSERSCHEINUNGEN.

VON

ALFR. LEHMANN.

MIT 30 IN ZINK GEÄTZTEN TAFELN.

LEIPZIG,
O. R. REISLAND.
1901.

VORREDE.

Als Nachwort seines Buches »In Sachen der Psychophysik« schrieb Fechner: »Der babylonische Turm wurde nicht vollendet, weil die Werkleute sich nicht verständigen konnten, wie sie ihn bauen sollten; mein psychophysisches Bauwerk dürfte bestehen bleiben, weil die Werkleute sich nicht verständigen können, wie sie es einreifsen sollen.«

Der Vater der Psychophysik hat recht gehabt.

Sein Werk steht noch. Durch die vielen, teils berechtigten, teils unverständigen Angriffe, die das grofse von ihm aufgetürmte Bauwerk während fast eines halben Jahrhunderts erfahren hat, ist es aber — wie das alte Häuschen in Andersens Märchen — so windschief und elend geworden, dafs es nicht weifs, nach welcher Seite es umstürzen soll, und eben deshalb bleibt es stehen. Auf einer solchen Grundlage kann eine Wissenschaft nicht weiter gebaut werden; der jetzige Stand der Psychophysik zeigt hinlänglich, wie das Fundament ins Schwanken geraten ist. Die experimentelle Forschung hat eine überwältigende Menge Thatsachen beschaffen, es fehlt aber vollständig an festen, einheitlichen Gesichtspunkten, worunter das Erfahrungsmaterial geordnet werden kann. Jeder Forscher legt die Thatsachen in seiner Weise aus; was in der gesamten Psychologie, aufser dem empirisch Gegebenen,

als feststehend, unangreifbar angesehen werden kann, läfst sich aller Wahrscheinlichkeit nach auf vier Oktavseiten schreiben. So kann es aber nicht weitergehen, wenn die Psychologie mit Recht den Namen einer Wissenschaft tragen will.

In dem vorliegenden Werke habe ich es versucht, der Fechnerschen Psychophysik eine Stütze anzusetzen. Dies ist einfach dadurch geschehen, dafs ich der Mafsformel Fechners ein ursprünglich empirisch gefundenes Glied hinzugefügt habe. Dem Anschein nach ist dies etwas recht Unbedeutendes; soweit ich aber bisher die Berechnungen habe durchführen können, zeigt es sich, dafs die korrigierte Mafsformel vor derjenigen Fechners den nicht unwesentlichen Vorzug hat, mit dem experimentell Gefundenen in vollständiger Übereinstimmung zu sein. Wie weit die Übereinstimmung reicht, läfst sich natürlich nicht voraussagen. An einem Punkte, in der physiologischen Farbenlehre, wo ich schon über das in dem vorliegenden Buche Gegebene hinausgegangen bin, hat es sich erwiesen, dafs die Formel in das Chaos der Erscheinungen völlige mathematische Ordnung und Gesetzmäfsigkeit bringt. Und es liegen in dem Buche Thatsachen genug vor, welche darauf deuten, dafs der Formel auch auf andern Gebieten eine weitreichende Bedeutung zukommt. Ist es mir also wirklich geglückt, das psychophysische Fundamentalgesetz zu finden, so wird dies nicht nur für die experimentelle Forschung, sondern auch in theoretischer Beziehung tiefgehende Konsequenzen haben — weil die physisch-physiologische Deutung des Gesetzes mit der Form desselben gegeben ist. Hierzu kommt noch der fernere Nachweis, dafs die bekannten Gesetze der elektrischen Stromverzweigung für die Energietransmissionen im Gehirn und die daran gebundenen psychischen Vorgänge gültig sind. Diese Thatsache — welche die Grundlage einer künftigen Psychodynamik

bilden wird — steht zwar nicht direkt mit dem psychophysischen Fundamentalgesetz in Verbindung, zeugt aber ebenfalls davon, auf welchem Gebiete wir die Gesetze des psychischen Geschehens suchen müssen. Ein kleiner Schritt vorwärts ist damit gethan, um die Psychologie — den Kampfplatz philosophischer Vermutungen und physiologischer Hypothesen — zu einer exakten Naturwissenschaft zu machen.

Jedem Sachverständigen wird es aus dem Buche einleuchten, dafs eine nicht geringe Arbeit darin niedergelegt ist. Wie grofs dieselbe eigentlich gewesen ist, kann doch kaum beurteilt werden, weil selbstverständlich nur diejenigen Berechnungen, die zu brauchbaren Resultaten führten, im Buche gegeben sind, während die zahlreichen vergeblichen Bemühungen, empirische Formeln aufzustellen, viel mehr Zeit in Anspruch genommen haben. Es würde mir deshalb gewifs auch nicht gelungen sein, die Arbeit durchzuführen, wenn die Direktion des Carlsbergfonds mich nicht in die Lage gebracht hätte, während der letzten Jahre meine Zeit ausschliefslich dieser Arbeit widmen zu können. Für diese Freigebigkeit, sowie für die Unterstützung zur Herstellung der Tafeln, statte ich der hochgeehrten Direktion hiermit meinen besten Dank ab.

Kopenhagen, Juni 1901.

Alfr. Lehmann.

INHALT.

EINLEITUNG.

Im ersten Teile dieses Werkes wurde nachgewiesen, dafs die vasomotorischen, die verschiedenen psychischen Zustände begleitenden Veränderungen solche Gesetzmäfsigkeit zeigen, dafs wohl kaum die Rede davon sein kann, sie wären nur zufällige Äufserungen der Arbeit des Zentralorgans. Sie müssen mit anderen Worten bestimmte Bedeutung haben, sie müssen zu etwas dienen, das unter gegebenen Umständen nur auf die besondere Weise zu erreichen ist, welche sich in den plethysmographischen Kurven abspiegelt. So könnte man z. B. annehmen, dafs das arbeitende Zentralorgan in jedem einzelnen Falle seine Blutzufuhr seinem Bedarf anpafste, und dafs es diese Regulierung gerade durch seine Einwirkung auf das Herz und die Gefäfsmuskeln vollzöge. Ob diese, oder irgend eine andere Annahme aber richtig ist, das vermochten wir wegen Mangels an hinlänglichem, empirischem Materiale nicht zu entscheiden, da sich aus der Form der Plethysmogramme keine bestimmten Schlüsse darüber ziehen liefsen, welche Veränderungen des Kreislaufs stattgefunden hatten. Ich kündigte deshalb, als Fortsetzung, eine Reihe von Untersuchungen an, die besonders dazu dienen sollten, aufzuklären, wie sich die Blutzufuhr des Gehirns während der verschiedenen psychischen Zustände verändert.

Zur Beantwortung dieser Frage habe ich ein nicht geringes Versuchsmaterial herbeigeschafft, jedoch ist es dieses nicht, was uns hier beschäftigen wird. Aus rein praktischen Gründen habe ich vorgezogen, erst einen anderen, für die Lösung unserer Hauptaufgabe ebenso

wesentliche Bedeutung besitzenden Punkt zu behandeln. Nehmen wir nämlich an, wir wären im Besitz einer Methode, die es gestattete, die Menge und Geschwindigkeit des Blutes, das in einem gegebenen Augenblicke bei einem normalen, unversehrten Menschen nach dem Gehirn fliefst, mit grofser Genauigkeit zu bestimmen. Wir würden alsdann darüber ins reine kommen, welche Veränderungen der Ernährung des Gehirns die verschiedenen psychischen Zustände begleiten. Hiermit würden wir aber offenbar durchaus nicht im stande sein, zu entscheiden, ob diese Ernährungsänderungen auch wirklich für die Arbeit des Gehirns notwendig sind. Weil ein psychischer Zustand *A* eine *n* mal so starke Blutzufuhr nach dem Gehirn mit sich bringt als ein anderer psychischer Zustand *B*, ist damit doch nicht unbedingt gegeben, dafs die stärkere Zufuhr für das Gehirn wirklich notwendig ist. Es liefse sich ja sehr wohl denken, dafs die stärkere Blutzufuhr eine dem Gehirn höchst ungünstige Folge der Störungen des Kreislaufs wäre, die im Organismus hervorgerufen wären und im Dienste ganz anderer Zwecke stünden. Es leuchtet also ein, dafs die Beantwortung der Frage nach der Bedeutung der Kreislaufsänderungen für die Arbeit des Gehirns die Lösung von zwei Problemen erheischt. Wir müssen 1) die Änderungen der Ernährung des Gehirns kennen, welche die verschiedenen psychischen Zustände, *A*, *B* u. s. w., begleiten. Und wir müssen 2) für diese psychischen Zustände einen Mafsstab haben. Wir müssen wissen, wieviel der potentiellen Energie des Gehirns während der Erzeugung der Zustände *A* und *B* in andere Energieformen umgesetzt wird, oder mit anderen Worten, wir müssen wissen, wieviel es kostet, diese Zustände zu erzeugen. Sind diese Probleme alle beide gelöst, so ist damit die Sache klar. Wissen wir einerseits, dafs die Erzeugung von *A* einen *n* mal gröfseren Energieverbrauch erfordert als die Erzeugung von *B*, und wissen wir anderseits, dafs *A* ebenfalls eine *n* mal gröfsere Blutzufuhr nach dem Gehirn bewirkt als *B*, so wird der Schlufs gewifs berechtigt sein, dafs das Gehirn die Blutzufuhr seinem Bedarf gemäfs reguliert.

Leider dessen sind wir für den Augenblick noch

lange nicht in der Lage, irgend eine dieser Aufgaben mit erwünschter Genauigkeit lösen zu können. Dies ist aber doch kein Grund, weshalb wir mit den Hilfsmitteln, welche die jetzige experimentale Technik uns zur Verfügung stellt, nicht einen Versuch unternehmen sollten. Wird hierdurch weiter nichts gewonnen, so wird doch jedenfalls erreicht, dafs man sieht, wo die Schwierigkeiten liegen, und je gröfser diese sind, um so zahlreicher werden die mifslungenen Anläufe sein, die gewöhnlich erfordert werden, bis die Wissenschaft zu völliger Klarheit gelangt. Zwischen Webers ersten, mangelhaften Versuchen, aus denen die Möglichkeit eines psychophysischen Gesetzes hervorging. und unserer heutigen Einsicht in die Bedeutung und Tragweite dieses Gesetzes liegt eine überwältigende Menge Arbeit, deren kein einziger Teil wohl als durchaus überflüssig zu betrachten wäre. In dem Umstande, dafs es mir ganz sicher nicht beschert ist, die endliche Lösung des schwierigen Problems von der Bedeutung der Störungen des Kreislaufs zu finden, sehe ich deshalb keinen Grund, mich von der Anstellung des Versuches zurückschrecken zu lassen.

Vorliegende Arbeit nimmt das Problem von einem physischen Mafse der Bewufstseinszustände zur Untersuchung vor. Einige Versuche in dieser Richtung wurden bereits früher unternommen. Der erste rührt von J. Loeb her, der in einer »vorläufigen Mitteilung« über die »Muskelthätigkeit als Mafs psychischer Thätigkeit«[1] nachwies, dafs der Druck, den man mit der Hand auf ein Dynamometer auszuüben vermag, sich bedeutend vermindert, wenn man zugleich eine psychische Arbeit ausführt, z. B. wenn man liest, Rechenaufgaben löst u. dergl. In der genannten Abhandlung kommt Loeb jedoch nicht weiter als bis zum Nachweis dieser Thatsache und verschiedener Schwierigkeiten, die sich einer naheliegenden Erklärung der Erscheinung entgegenstellen; es war mir nicht möglich, eine spätere, eingehendere Behandlung der Sache von der Hand desselben Autors zu finden. Viel weiter gehen Férés

[1] Pflügers Archiv für Physiologie. Bd. XXXIX. 1886.

Untersuchungen[1]. Er konstatierte ebenfalls, dafs der auf ein Dynamometer geübte Druck höchst variabel ist und vorzüglich von den gleichzeitigen Bewufstseinszuständen abhängig zu sein scheint, indem derselbe sich sowohl mit deren Qualität als mit deren Intensität verändert. Bei Sinnesreizen bestimmter Art, aber verschiedener Stärke glaubt Féré gefunden zu haben, dafs die Muskelkraft mit der Stärke des Reizes anwächst; jedoch gilt dies nur bis zu einem gewissen Punkte, denn wächst die Empfindung bis zu unangenehmer Stärke, so fällt der Druck bis unter die normale Gröfse. Überhaupt werden Zustände der Unlust die Gröfse des Druckes vermindern, Zustände der Lust dieselbe dagegen vermehren. »Ces faits nous montrent que toute excitation détermine immédiatement une production de force, et on peut en déduire légitimement que les fonctions psycho-physiologiques, comme les forces physiques, se réduisent à un travail mécanique. Nos expériences montrent en somme que dans des circonstances appropriées le dynamomètre peut être appliqué à la mesure des sensations[2].«

Es ist sehr wohl möglich, dafs Férés Untersuchungen mit grofser Sorgfalt und mit all der Genauigkeit, die seine ziemlich unvollkommenen Mefsapparate gestatteten, ausgeführt wurden, seine Arbeit bringt aber keinenfalls diesen Eindruck hervor. Man vermifst erstens eine grofse Menge Voruntersuchungen, die er hätte anstellen sollen, um die Möglichkeit auszuschliefsen, dafs die beobachteten Veränderungen von anderen Ursachen herrühren können. Ermüdung und Übung haben, wie wir wissen, grofsen Einflufs auf die Muskelkraft, und die Gröfse und die Richtung dieser Wirkungen mufs man notwendigerweise kennen, bevor man den Einflufs anderer Faktoren zu bestimmen vermag. Ferner ist es ebenfalls eine bekannte Sache, dafs der Takt, in welchem die Muskelkontraktionen ausgeführt werden, für deren Gröfse von wesentlicher Bedeutung ist; aber auch die Wirkungen des Taktes

---

[1] Féré, Sensation et mouvement. Paris 1887.

[2] Ibid. S. 33.

wurden nicht speziell untersucht. Und da man nun in den Dynamogrammen, mit denen Féré seine Ausführungen illustriert, häufig sieht, dafs sich der Takt verändert, während zugleich die Gröfse des Drucks variiert, so ist die Möglichkeit nicht ausgeschlossen, dafs die Druckveränderungen, wenigstens in vielen Fällen, sekundäre Erscheinungen wären, die nur von den Taktveränderungen herrührten. Recht bedenklich ist auch die mathematische Genauigkeit, mit welcher die Druckveränderungen die Variationen der Sinnesreizungen begleiten[1]. Bei psychophysiologischen Versuchen an Menschen gibt es immer ein Gewühl störender Momente, die sich geltend machen, und man darf gewifs behaupten, dafs einigermafsen genaue quantitative Bestimmungen nur als Mittel einer sehr grofsen Anzahl von Messungen zu erhalten sind. Bei Féré findet man aber nicht die geringste Andeutung, dafs seine regelmäfsig variierenden Zahlenreihen Mittelzahlen sind. Im Gegenteil scheint aus dem Texte an den citierten Orten hervorzugehen, dafs die Zahlen mittels einer einzelnen Versuchsreihe gewonnen sind. Und wenn man nun sieht, dafs diese Versuche an hypnotisabeln Hysterikern, also an den der Suggestion am meisten zugänglichen Individuen, die zu finden sind, ausgeführt wurden, so entsteht im kritischen Leser eine gewaltige Vermutung, dafs die Wünsche des Experimentators nach regelmäfsigen Zahlenreihen unbewufst auf die Entstehung dieser Resultate entscheidenden Einflufs gehabt haben. Sehr viel erfährt man nicht in Férés Buche über seine Versuchsmethode, und das wenige, das durchschimmert, ist der Art, dafs es eher das Vertrauen auf die angeführten Resultate schwächt. Darum können diese natürlich sehr wohl richtig sein, man wagt es aber nicht, sich auf dieselben zu verlassen, ohne sie vorerst einer sorgfältigen Kontrolle zu unterwerfen.

Was ferner die Auslegung der gewonnenen Versuchsresultate betrifft, so verrät diese einen traurigen Mangel an Verständnis von der Schwierigkeit der Sache. Féré glaubt, wie es aus dem oben angeführten Citate

[1] Ibid. S. 37 u. 39.

hervorgeht, dafs jede Reizung des Organismus eine Produktion von Kraft bewirke, die sich unmittelbar durch die Gröfse der Muskelkontraktion Ausdruck gebe, und die sich also aus den Dynamogrammen ablesen lasse. Wie er sich den Vorgang dieser Kraftproduktion denkt, darüber sagt er nichts Bestimmtes; im Gegenteil erhält der Leser an verschiedenen Stellen recht verschiedene Äufserungen. So heifst es S. 51: »On peut donc dire, en résumé, que toutes les sensations s'accompagnent d'un développement d'énergie potentielle qui passe à l'état cinétique et se traduit par des manifestations motrices susceptibles d'être mises en évidence même par des procédés grossiers comme la dynamométrie.« Weiter unten auf derselben Seite heifst es aber von denselben Verhältnissen: »On peut donc dire que toute excitation périphérique détermine une augmentation d'énergie potentielle.« Wenn jeder Reiz — oder jede durch einen solchen ausgelöste Empfindung — zur Folge hat, dafs einige potentielle Energie in kinetische übergeht, so scheint die Menge der vorhandenen potentiellen Energie mithin abnehmen zu müssen, und es wird schwer zu verstehen, wie der Verf. 18 Zeilen weiter unten behaupten kann, sie nehme zu. Die Verwirrung wird aber noch gröfser, denn S. 58 liest man: »Les expériences que j'ai rapportées . . . ont pour résultat spécial de montrer que les excitations périphériques déterminent une augmentation de l'énergie disponible, de la force utilisable.« Was hiermit gemeint wird, ist nicht leicht zu verstehen, da der Verf. keine nähere Bestimmung davon gibt, welchen Sinn er diesen Worten beilegt. Versteht man indes unter »disponibler Energie« das nämliche, was in der Physik durch den Begriff der »freien« Energie bezeichnet wird, so gibt der Ausdruck allerdings einen Sinn, führt in diesem Falle aber, wie wir später sehen werden, zu einer Ansicht, die nur sehr geringe Wahrscheinlichkeit für sich hat. Mit Sicherheit läfst sich aus diesen verschiedenen Äufserungen nur schliefsen, dafs Féré nicht im stande ist, eine Erklärung der Sache zu geben.

Es ist nicht einmal möglich, im ganzen Werke darüber ins reine zu kommen, ob Herr Féré sich die

erwähnten Energieveränderungen als im Zentralorgan oder in den Muskeln vorgehend gedacht hat. Da es die Sinnesreize — oder die durch dieselben hervorgerufenen psychophysiologischen Vorgänge — sind, die die Energieveränderungen unmittelbar herbeiführen, müſste man sich wohl zunächst denken, daſs diese im Gehirn vorgehen, und daſs sie sich wegen der motorischen Innervationen durch Muskelbewegungen äuſsern. An verschiedenen Orten eröffnet der Verf. aber die Aussicht auf eine ganz andere Erklärung[1]. Der Verf. giebt hier auſser den Dynamogrammen zugleich auch Plethysmogramme, welche die Volumänderungen des Arms während derselben Sinnesreize zeigen, und er behauptet nun, die Änderungen der Blutzufuhr seien mit denen der Muskelkraft übereinstimmend (concordantes). Was hiermit gemeint wird, ist nicht gut zu sagen, denn über die Umstände, unter welchen die Plethysmogramme aufgenommen wurden, erfährt man absolut nichts. Die Stärke des Reizes, die Zeitpunkte, da er in Beziehung zur Volumkurve anfängt und aufhört, werden nicht angegeben, ja es wird nicht einmal gesagt, ob das Plethysmogramm und das Dynamogramm gleichzeitig oder jedes für sich genommen wurden. Und da F é r é s Plethysmogramme, wie alle anderen derartigen Kurven, Steigungen und Senkungen zeigen, läſst es sich unmöglich entscheiden, ob er sich denkt, daſs ein Steigen des Volums einem Steigen der Muskelkraft entspricht, oder ob möglicherweise das Steigen der einen Kurve mit einem Sinken der anderen korrespondiert. Kurz: F é r é s Darstellung ist zunächst ein Spiel mit physiologischen Redensarten und Abbildungen, das mit der Wissenschaft sehr wenig zu schaffen hat. Findet sich aber wirklich Übereinstimmung des Plethysmogramms mit dem Dynamogramm, so werden wir ganz natürlich zu einer ganz neuen Erklärung der beobachteten Schwankungen der Muskelkraft bewogen. Denn da jeder psychische Zustand von Veränderungen des Blutkreislaufes begleitet ist, so sind die Variationen der Muskelkraft möglicherweise nur Folgen der veränderten Blutzufuhr nach dem Arm. Die Dynamogramme wären in diesem

[1] Ibid. S. 10, 40, 41 u. 45.

Falle nur eine andere, und zwar unvollkommenere Form der Plethysmogramme, und als Mafs für die Stärke der psychophysiologischen Vorgänge wäre die eine Kurve nicht brauchbarer als die andere. Es leuchtet also ein, dafs ein physischer Mafsstab für die psychischen Zustände auf dem von Féré angedeuteten Wege nicht zu gewinnen ist, es sei denn, dafs es uns gelänge, nachzuweisen, dafs die Schwankungen der Muskelkraft nicht von den Variationen der Blutzufuhr des Arms herrühren können.

Es wird, wie man sieht, eine ziemlich bedeutende Arbeit erforderlich sein, bis man hier zu brauchbaren Resultaten kommen kann. Alle Experimente müssen kontrolliert werden, am liebsten mit weit vollkommneren Mefsapparaten als den früher gebrauchten, und verschiedene Erklärungsmöglichkeiten sind auszuschliefsen, bevor sich sichere Schlüsse ziehen lassen. Ehe wir aber den Weg einschlagen, der hier durch die Kritik des Féréschen Werkes skizziert wurde, erhebt sich ganz natürlich die Frage, ob es überhaupt denkbar ist, dafs sich ein physisches Mafs für die Bewufstseinszustände sollte finden lassen. Ein solches Mafs besitzen wir bereits für eine grofse Gruppe psychischer Zustände, nämlich für die durch äufsere Sinnesreize hervorgerufenen Empfindungen, indem diese durch die Stärke des physischen Reizes gemessen werden können. Zwischen der Empfindung E und dem Reize R besteht ja bekanntlich das durch das Webersche Gesetz ausgedrückte Abhängigkeitsverhältnis:

$$E = c \log. \frac{R}{R_0} \quad \ldots\ldots \text{(Gleich. 1)},$$

wo c eine Konstante und R_0 die gröfste, noch keine Empfindung hervorrufende Reizung (den Schwellenwert) bezeichnen. Jedoch gilt Webers Gesetz auf keinem Sinnesgebiete mit Genauigkeit, kaum einmal mit Annäherung; nirgends findet man E dem log. R genau proportional. Richtiger ist es deshalb

$$E = c \log. \left[\frac{R}{R_0} \cdot \varphi (R)\right] \quad \ldots\ldots \text{(Gleich. 2)}$$

zu setzen, wo φ eine einstweilen unbekannte Funktion ist, deren Form sich wenigstens annähernd be-

stimmen läſst. Gleich. 2 gibt uns also, wenn die Konstanten c und R_0 bestimmt sind, ein Maſs für die Empfindungen mit Hilfe der Sinnesreize. Diese Formel kann aber durchaus keine Anwendung auf alle zusammengesetzteren Bewuſstseinszustände finden, denen entweder kein äuſserer Reiz entspricht, oder bei denen dieser jedenfalls für die Entstehung des Zustandes von untergeordneter Bedeutung ist. Die Frage ist daher die, ob sich ein Maſs finden läſst, das auf alle Bewuſstseinszustände angewandt werden kann. Ein solches Maſs kann der Natur der Sache zufolge nur an den zentralen Hirnvorgängen gefunden werden, an welche die psychischen Zustände unmittelbar gebunden sind, denn diese physiologischen Vorgänge sind die einzigen, die jedesmal, wenn ein psychischer Zustand entsteht. mit Notwendigkeit vorausgesetzt werden müssen. Das Problem spaltet sich hier offenbar in zwei Probleme, ein theoretisches und ein praktisches. Ersteres können wir so formulieren: läſst sich die Existenz eines derartigen Abhängigkeitsverhältnisses zwischen den Veränderungen im Zentralorgane und den an dieselben unmittelbar gebundenen Bewuſstseinszuständen nachweisen, daſs die physiologischen Vorgänge als Maſs der psychischen Zustände angewandt werden können? Und die mehr praktische Frage wird darauf die: läſst sich auf dem von Féré angedeuteten oder möglicherweise auf einem anderen Wege ein Maſs der physiologischen Vorgänge finden, an welche die psychischen Zustände unmittelbar gebunden sind? Letztere Frage wird uns später beschäftigen; sie hat offenbar kein groſses Interesse, jedenfalls nicht für unsere Untersuchungen, bevor wir darüber ins reine gekommen sind, ob zwischen der Intensität eines psychischen Zustandes und der Stärke der körperlichen Veränderung, an die derselbe gebunden ist, überhaupt ein Abhängigkeitsverhältnis existiert, das sich mathematisch formulieren läſst.

Diese Frage ist in der Psychologie nicht neu; sie wurde zuerst von Fechner gleichzeitig mit der Formulierung des Weberschen Gesetzes erhoben. Der Reiz und die Empfindung sind ja nämlich die beiden äuſsersten Glieder einer langen Reihe von Ursachen und Wirkungen, und es ist deswegen durchaus unbestimmt, zwischen

welchen beiden Gliedern der Kausalreihe das logarithmische Abhängigkeitsverhältnis sich in der That geltend macht. Drei wesentlich verschiedene Deutungen, eine physiologische, eine psychophysische und eine rein psychologische, sind hier möglich, und jede dieser Deutungen hat ihre Vertreter gefunden, ohne dafs der Streit zu einem endlichen Resultate geführt hätte. Da es indes, wie nachgewiesen, für unsere weiteren Untersuchungen die wesentliche Bedingung ist, dafs wir hier zu einer bestimmten Entscheidung gelangen, müssen wir die verschiedenen Auffassungen also einer näheren Kritik unterwerfen. Und da es sich darum handelt, zwischen bestimmten Gröfsen ein Abhängigkeitsverhältnis zu finden, wird es am einfachsten sein, dafs wir den Anfang damit machen, die Mafseinheiten zu präzisieren, durch welche diese Gröfsen ausgedrückt werden müssen. Erst wenn wir uns dies klar gemacht haben, wird es möglich sein, die verschiedenen Auffassungen exakt zu formulieren.

Mit Bezug auf die Empfindungen herrscht kein Zweifel. Unter der gegebenen Stärke E einer Empfindung läfst sich überhaupt nichts anderes verstehen, als die Anzahl ebenmerklich verschiedener Empfindungen, die sich zwischen den Grenzen 0 und E unterscheiden lassen. Unter den psychophysischen Mefsmethoden giebt es streng genommen nur eine einzige — die Methode der ebenmerklichen Unterschiede — die direkt darauf abzielt, das Verhältnis zwischen der Stärke der Empfindungen und der der Reize zu bestimmen. Hier ist aber auch deutlich zu ersehen, dafs die Stärke der Empfindung nur die Empfindungs-Anzahl bedeutet. Denn die Messung geht gerade darauf aus, zu bestimmen, einen wie grofsen Zuwachs der Reiz haben mufs, damit noch eine andere Empfindung — derselben Art, jedoch von der vorhergehenden verschieden — entstehen kann.

Dafs die Intensität einer Empfindung E ist, will also weiter nichts heifsen, als dafs zwischen 0 und E eine Anzahl von E möglichen, d. h. ebenmerklich verschiedenen Empfindungen liegen. Webers Gesetz drückt also nur die — allenfalls annähernd richtige — Thatsache aus, dafs die Stärke der Reize mit konstantem Quotienten anwachsen mufs, wenn die Anzahl der mög-

lichen Empfindungen mit konstanter Differenz wachsen soll. Wäre man hierbei stehen geblieben, so hätte man vielen Streit und viele weitläufige Diskussionen vermieden. Allein das Bedürfnis der Anschaulichkeit führte hier die Psychologen auf Irrwege. Man dachte sich die Empfindung als eine extensive Gröfse, z. B. als eine Linie von bestimmter Länge. Die Zahl E wird in diesem Bilde die Anzahl der Längeneinheiten, welche die Linie enthält, und die Längeneinheit selbst repräsentiert wieder den Unterschied zwischen zwei aufeinander folgenden Empfindungen, mithin den ebenmerklichen Unterschied. Hierdurch entsteht die Fiktion, man habe die Intensität der Empfindung mittels einer psychischen Einheit, nämlich mittels des ebenmerklichen Empfindungsunterschieds gemessen. Dafs dies eine Fiktion ist, erweist sich ganz einfach dadurch, dafs eine Empfindung sich nicht aus einer Anzahl anderer Empfindungen auf dieselbe Weise aufbauen läfst, wie man z. B. eine Linie hervorbringen kann, wenn man eine Anzahl Längeneinheiten in ihrer Verlängerung absetzt. Es ist deshalb zunächst sinnlos zu nennen, wenn man sagt, die Intensität einer Empfindung werde mittels der Zahl E «gemessen», denn es kann hier von einer Messung in gewöhnlichem Sinne gar keine Rede sein, da wir keine Mafseinheit besitzen. Dieser unbestreitbar falsche Sprachgebrauch stiftet jedoch keinen Schaden, wenn man nur die wahre Bedeutung der Zahl E als der Anzahl möglicher Empfindungen zwischen 0 und E festhält.

Brächte das genannte Anschauungsbild nun keine anderen Übelstände mit sich, als einen weniger geeigneten Sprachgebrauch, so läge wohl kaum Grund vor, sich darüber aufzuhalten. Die Anwendung des Bildes ist aber von einem anderen und viel ungünstigeren Umstande begleitet, — man erschleicht nämlich die Lösung eines Problems, das sich in der That nur auf empirischem Wege entscheiden läfst. Es seien E_1, E_2, E_3 und E_4 vier nur intensiv verschiedene Empfindungen, so gewählt, dafs sich zwischen E_1 und E_2 derselbe Unterschied wie zwischen E_3 und E_4 zeigt. Werden nun auch die Differenzen der Zahlen, also $E_1—E_2$ und $E_3—E_4$, gleich grofs sein? Hierüber wissen wir von vornherein offenbar durchaus nichts. Diese Zahlen bezeichnen nur

die Anzahl der zwischen *0* und resp. E_1, E_2 u. s. w. möglichen Empfindungen. Weil zwei Empfindungsunterschiede sich als gleich grofs erweisen, ist es aber durchaus nicht gegeben, dafs sie auch dieselbe Anzahl möglicher Empfindungen umfassen. Dies wird der Fall sein, wenn alle eben merklichen Unterschiede gleich grofs sind, hierüber wissen wir aber nichts. Hier mufs nun unser Anschauungsbild der Empfindung als einer extensiven Gröfse ungünstig wirken, indem dasselbe folgerichtig eine bestimmte Lösung des vorliegenden Problems herbeiführt. Indem die Empfindung *E* nämlich als eine Linie von der Länge *E* angeschaut wird, werden alle zwischen *0* und *E* möglichen Empfindungen als Strecken dieser Linie aufgefafst, und jede neue Empfindung ist dann um eine Längeneinheit gröfser als die zunächst vorhergehende. Somit wird also willkürlich festgestellt, dafs alle ebenmerklichen Unterschiede gleich grofs, nämlich gleich der Einheit sind; dies ist aber eine durchaus unzulässige Erschleichung, die allerdings so nahe liegt und so natürlich ist, dafs man erst in der jüngsten Zeit ernstlichen Zweifel an ihrer Berechtigung erhoben hat.

Unsere Untersuchungen sollten nun zweifelsohne damit anfangen, die Lösung der Frage zu suchen: ob ebenmerkliche Unterschiede zwischen Empfindungen derselben Art ebenfalls gleich grofse Empfindungsunterschiede sind; denn die Beantwortung mufs für alle weitere Erforschung des Verhältnisses zwischen Empfindung und Reiz von entscheidender Bedeutung werden. Hier können wir das Problem jedoch nicht erschöpfend behandeln. Wie gesagt läfst es sich nur auf empirischem, auf experimentellem Wege lösen. Bisher liegt nur ein einzelner Beitrag hierzu vor, nämlich Aments: »Über das Verhältnis der ebenmerklichen zu den übermerklichen Unterschieden bei Licht- und Schallintensitäten«[1], und der Verf. kommt hier zu dem Ergebnis, man müsse annehmen, dafs die ebenmerklichen Unterschiede mit den Reizen anwüchsen. Eine kritische Betrachtung der Untersuchung zeigt jedoch, dafs dieses Ergebnis nur erscheint, weil bei der

---

[1] Wundt, Phil. Stud. Bd. XVI. S. 135 u. f.

Berechnung der unmittelbar gewonnenen Versuchsdaten eine Reihe wesentlicher Fehler begangen wurden. Sobald die Fehler korrigiert werden, kommt mit aller wünschenswerten Deutlichkeit das entgegengesetzte Ergebnis zum Vorschein. Es wird indes schwierig sein, in diesem Augenblicke den näheren Nachweis hiervon anzuführen; am rechten Orte wird dieser als natürliches Glied der folgenden Untersuchungen geliefert werden. Ich greife deshalb dem Laufe der Begebenheiten vor und stelle die Behauptung auf:

Es läfst sich als dargethan betrachten, dafs alle ebenmerklichen Unterschiede zwischen Empfindungen in derselben Intensitätsreihe gleich grofs sind, oder mit anderen Worten, dafs gleichgrofse Empfindungsunterschiede dieselbe Anzahl möglicher, d. h. ebenmerklicher Empfindungen umfassen.

Von dieser Voraussetzung gehen wir im Folgenden aus, und der Beweis für unsere Berechtigung hierzu wird später geführt werden[1].

Die Reize werden natürlich mittels ihrer Energie gemessen. Zwei Normalkerzen in gegebener Entfernung entsenden doppelt so viel Licht nach dem Auge als ein einziges Licht in derselben Entfernung; bei den rotierenden Scheiben nimmt die das Auge treffende Lichtmenge um die Gradanzahl des weifsen Sektors zu. Meterkerzen und das Gradmafs der Sektoren sind in der That also Energiemafse. Die Stärke der Schallreize wird stets, wenn es nur irgend thunlich ist, durch das Produkt des Fallgewichts und der Fallhöhe gemessen, dieses Produkt ist aber gerade der Ausdruck für die in Schallschwingungen umgesetzte Bewegungsenergie. Gebraucht man von Wärmereizen ganz einfach Grad C, so ist dies ebenfalls ein Energiemafs, indem man innerhalb gewisser Grenzen davon ausgehen darf, dafs ein gegebener, mit einem begrenzten Teile der Hautoberfläche in Berührung gebrachter Körper an die Haut eine Wärmemenge abgeben wird, die der Temperaturdifferenz zwischen der Haut und dem berührenden Körper pro-

---

[1] Siehe den Abschnitt: Über die Gemeingültigkeit des Unterscheidungsgesetzes.

portional ist. Wenn man endlich als Geschmacksreiz eine konstante Menge einer Auflösung und als Mafs für die Stärke des Reizes den Prozentinhalt des aufgelösten Stoffes gebraucht, so ist auch dies ein Energiemafs, indem ein bestimmtes Quantum eines chemisch wirksamen Stoffes eine bestimmte Energiemenge repräsentiert. Soweit ich zu sehen vermag, ist der Drucksinn unter unseren Sinnen der einzige, der in dieser Beziehung eine Ausnahme bildet; hier werden die Reize nicht durch irgend ein Energiemafs, sondern in Kraftmafs (Gramm) gemessen [1].

Zwischen den Reizen und den Empfindungen liegen die Nervenvorgänge. Die Feststellung einer bestimmten Art des Mafses hat in betreff derselben keine praktische Bedeutung gehabt, da man sich — mit Ausnahme vielleicht eines einzelnen, sehr mangelhaften Versuches — noch nie darauf eingelassen hat, sie zu messen. Dies überhebt uns aber nicht einer bestimmten Wahl, wenn wir mittels einer theoretischen Untersuchung die möglichen Relationen zwischen der Stärke des Reizes und der des Nervenvorgangs festzustellen wünschen. Welche Art des Mafses zu wählen ist, scheint mir keinem Zweifel zu unterliegen. Denn da die Nervenvorgänge physische Erscheinungen sind, die mit anderen physischen Erscheinungen (den Reizen) in Beziehung gebracht werden sollen, müssen beide Gröfsen durch dasselbe Mafs ausgedrückt werden. An diesem Punkte ist der menschliche Organismus wie jede andere Maschine zu betrachten und zu behandeln. Wird der Maschine ein gewisses Quantum Arbeit zugeführt, so ist es die Aufgabe, zu untersuchen, was innerhalb der Maschine aus dieser Arbeit wird, und alle hier stattfindenden Umbildungen lassen sich nur als Arbeit messen. Messen wir also die Reize der Sinnesorgane als Arbeit (Energie), so müssen die aus denselben resultierenden Nervenvorgänge ebenfalls als Energie gemessen werden [2].

---

[1] M. v. Frey, Untersuchungen über die Sinnesfunktionen. Leipzig 1896.

[2] Dies thut denn auch Fechner (Elemente II, S. 163 u. f.); nur unter bestimmten theoretischen Voraussetzungen — um die psychophysische Mafsformel auch auf oszillatorische Bewegungen anwenden zu können — wirft er den Zweifel auf, ob die Empfindung von der

Es ist nicht viel, was wir von den psychophysischen Vorgängen, den Energieumsätzen im Zentralorgane, wissen, an welche unsere Bewufstseinszustände unmittelbar gebunden sind. Es darf aber wohl als aufser allen Zweifel gestellt betrachtet werden, dafs sie darauf beruhen, dafs ein Teil, C, der potentiellen Energie, die in der Form leicht zersetzbarer chemischer Verbindungen im Gehirn deponiert ist, in andere Energieformen, in Wärme, V, Elektrizität, W, und möglicherweise noch andere, unbekannte, Formen, X, Y, Z u. s. w., umgesetzt wird. Dem Gesetze der Erhaltung der Energie zufolge sind wir nun zu der Annahme berechtigt, dafs wir überall finden werden:

$$C = V + W + \ldots + X + Y + Z \ldots \quad \text{(Gleich. 3.)}$$

Durchaus unbestreitbar ist dies allerdings nicht, denn da bisher noch kein Mensch die Energieverhältnisse des Gehirns untersucht hat, haben wir keine Garantie, dafs das Energiegesetz auch hier gültig ist. Und kann überhaupt irgendwo die Rede davon sein, Abweichungen von demselben zu finden, so müfste dies auch wohl hier sein, wo das Psychische mit ins Spiel kommt. Indes ist es berechtigt, vorauszusetzen, dafs das Gesetz auch für das Gehirn Gültigkeit besitzt, solange für das Entgegengesetzte keine unanfechtbaren Beweise vorliegen. Wir gehen also davon aus, dafs jeder psychische Zustand unmittelbar an Energietransformationen gebunden ist. die das Energiegesetz befolgen, und für die mithin Gleich. 3 gilt. Ob der psychische Zustand nun an alle diese verschiedenen Energiemengen gebunden ist, oder ob nur einige oder vielleicht nur eine einzelne derselben von Bedeutung ist, das zu entscheiden gebricht es uns für den Augenblick offenbar an jedem Mittel. Hier stehen alle Möglichkeiten offen. Bezeichnen wir durch die P-Energie die Energieentwickelung, an die ein psychischer Zustand unmittelbar gebunden ist, so kann man haben:

$$C = \overbrace{V + W + \ldots + X + Y + Z}^{P} \ldots \quad \text{(Gleich. 4),}$$

Geschwindigkeit oder von der Geschwindigkeitsänderung (Acceleration) der Massenteile abhängig sei. (Elemente II, S. 201 u. f.)

wo das über der rechten Seite der Gleichung angebrachte P bezeichnen soll, dafs alle diese bekannten und unbekannten Energieformen für die Entstehung des psychischen Zustandes notwendig sind. Man kann aber auch haben:

$$C = P + V + W + \ldots . + X + Y + Z \ldots . \text{(Gleich. 5)},$$

wodurch ausgedrückt wird, dafs man sich den psychischen Zustand an eine einzelne bestimmte Energieform besonderer Art gebunden denken kann. Zwischen den beiden, durch die Gleichungen 4 und 5 ausgedrückten Auffassungen sind, wie leicht zu ersehen, viele verschiedene Übergänge möglich; diese näher zu präzisieren, hat aber für uns keine Bedeutung. Hier kommt es nur darauf an, eine hinlänglich klare Definition des Begriffes der P-Energie zu erhalten, für den wir im Folgenden häufige Anwendung finden werden. Wir verstehen also unter der P-Energie diejenige im Zentralorgane entwickelte Energie, an welche eine psychische Erscheinung unmittelbar gebunden ist, einerlei, ob diese Energie bestimmter, besonderer Art ist (Gleich. 5), oder ob sie möglicherweise eine Summe verschiedener Energieformen ist, deren gegenseitiges Mengeverhältnis variieren kann (Gleich. 4).

Wir sind jetzt im stande, die verschiedenen Deutungen des Weberschen Gesetzes genau zu formulieren. Der physiologischen Auffassung zufolge findet zwischen den physischen Reizen und den Nervenvorgängen, in letzter Instanz also den Veränderungen im Zentralorgane, der P-Energie, das logarithmische Abhängigkeitsverhältnis statt. Man hat dann:

$$P = c_1 \log. \left[\frac{R}{R_0} . \varphi (R)\right] \ldots . . \text{(Gleich. 6.)}$$

Durch Zusammenhalten der Gleich. 6 mit Gleich. 2 ergiebt sich: $E = k . P$, wo k eine Konstante ist. Oder mit anderen Worten: nach der physiologischen Deutung des Weberschen Gesetzes mufs die Intensität des psychischen Zustandes der P-Energie proportional anwachsen. Die psychophysische Theorie dagegen nimmt

an, dafs die Energie der Nervenvorgänge der Stärke der Sinnesreize proportional ist, durch die sie hervorgerufen wurden; nach dieser Auffassung hat man also $P = k \cdot R$, was in die Gleich. 2 eingesetzt ergibt:

$$E = c \log. \left[\frac{P}{P_0} \cdot \varphi \left(\frac{P}{k} \right) \right] \quad \ldots\ldots \text{(Gleich. 7).}$$

Hier besteht das logarithmische Abhängigkeitsverhältnis also zwischen der psychischen Erscheinung, der Empfindung E, und dem zentralen Vorgange, an welchen sie gebunden ist. Welche dieser beiden Auffassungen die richtige ist, thut in sofern nichts zur Sache. Selbst wenn es uns nicht zu entscheiden gelingt, ob Gleich. 6 oder Gleich. 7 gültig ist, so wird in beiden Fällen ein physisches Mafs für die Bewufstseinszustände theoretisch möglich. Gilt Gleich. 6, so wird der psychische Zustand der P-Energie direkt proportional sein; gilt dagegen Gleich. 7, so wird das Abhängigkeitsverhältnis also komplizierter; in beiden Fällen läfst sich aber die P-Energie als Mafs der Empfindung E gebrauchen.

Anders verhält es sich mit Wundts psychologischer Deutung des Weberschen Gesetzes[1]. Wundt geht von der Thatsache aus, dafs die verschiedenen Methoden, die sich zur Prüfung der Gültigkeit des Gesetzes anwenden lassen, zu ganz verschiedenen Ergebnissen führen. Mittels einiger Methoden findet man, dafs eine arithmetische Progression der Empfindungen annähernd eine geometrische Progression der Reize erfordert, mittels andrer Methoden ergibt sich dagegen eher eine direkte Proportionalität der beiden Gruppen von Erscheinungen. Die Versuchsbedingungen sind also von wesentlicher Wichtigkeit; welches Ergebnis man erlangt, ist zunächst davon abhängig, unter welchen Verhältnissen unser Unterscheiden stattfindet. Da wir nun thatsächlich nie mit Empfindungen an und für sich, sondern stets nur mit apperzipierten Empfindungen zu schaffen haben, fällt es ganz natürlich, die gröfsere oder geringere Annäherung an das Webersche Gesetz zunächst als einen durch die Apperzeption bedingten Zufall zu betrachten. Zwischen den Empfindungen und

---

[1] Physiologische Psychologie. I[4], S. 393 u. f.

deren äufseren Ursachen besteht wahrscheinlich ein bestimmtes mathematisches Abhängigkeitsverhältnis; wir sind aber nicht im stande, über die Natur dieses Verhältnisses irgend etwas zu entscheiden, da die Apperzeption der Empfindungen alle mathematische Bestimmtheit vereitelt. — Ist diese Auffassung richtig, so sehe ich nicht anders, als dafs wir auf immer darauf verzichten müssen, für unsere Bewufstseinszustände ein physisches Mafs zu finden. Es nützt uns nämlich nicht im geringsten, dafs zwischen E und R wahrscheinlich ein bestimmtes mathematisches Abhängigkeitsverhältnis existiert, denn dieses Verhältnis läfst sich nicht finden, wenn E eine der Beobachtung durchaus unzugängliche Erscheinung ist. Und es gibt kein konstantes Verhältnis der apperzipierten Empfindung, die wir kennen, zum Reize, denn gerade bei der Apperzeption kann die Intensität der Empfindung, allenfalls innerhalb gewisser Grenzen, sich verändern.

Es leuchtet also ein, dafs die Möglichkeit, ein physisches Mafs der Bewufstseinszustände zu finden, mit derjenigen Deutung des Weberschen Gesetzes steht und fällt, welche sich als die rechte erweist. Wir müssen deshalb vorerst die Beantwortung dieser Frage finden. Und das Resultat, zu dem wir gelangen werden, sollte gern so gut begründet sein, dafs an seiner Richtigkeit überhaupt kein Zweifel entstehen kann. Denn alle weiteren Bestrebungen, ein physisches Mafs der Bewufstseinszustände zu finden, werden offenbar völlig absurd, wenn man nicht vorher die Gewifsheit erlangt hat, dafs ein solches Mafs überhaupt möglich ist. Wir können uns deshalb nicht damit begnügen, die verschiedenen Deutungen des Weberschen Gesetzes einer kritischen Behandlung zu unterwerfen; logische Räsonnements und apriorische Argumente können hier schon gut sein, auf diesem Wege gelingt es — glücklicherweise[1] — aber nur selten, andere als diejenigen zu

---

[1] Ich sage ausdrücklich »glücklicherweise«, denn gelänge es wirklich, jemand zu überzeugen, so sähe es wahrlich um die Wissenschaft übel aus. Ein gutes Beispiel in dieser Richtung hat man an Meinongs: »Über die Bedeutung des Weberschen Gesetzes.« (Zeitschr. für Psychol. u. Phys. Bd. XI.) Aus einigen zweckdienlich gewählten Definitionen und Symbolen schliefst der Verf.: »es liegt nahe genug,

überzeugen, welche schon vorher derselben Meinung sind. Wir haben hier mit anderen Worten eine Realitätsfrage vor uns, die sich mit Sicherheit erst beantworten läfst, wenn das erforderliche empirische Material vorliegt. Dies ist aber augenscheinlich noch nicht der Fall, da die zahlreichen Diskussionen über das Webersche Gesetz bisher noch zu keinem endlichen Resultate geführt haben.

Der Weg, den wir hier einschlagen, ist nicht schwer anzugeben. Vor allen Dingen müssen wir die genaue Form des Weberschen Gesetzes kennen, den mathematischen Ausdruck, der wirklich alle vorliegenden genauen Bestimmungen der Unterschiedsempfindlichkeit auf den verschiedenen Sinnesgebieten umfafst. Darauf ist zu untersuchen, ob diese Formel sich nicht aus bekannten physischen und physiologischen Gesetzen ableiten läfst, was zu einer bestimmten Auffassung davon führen kann, welche Kräfte die durch das korrigierte Webersche Gesetz ausgedrückte Gesetzmäfsigkeit bewirken. Hierdurch wird dann in der That entschieden sein, welche der verschiedenen möglichen Deutungen die rechte ist.

Wenn ich glaube, im Folgenden einen nicht unwesentlichen Beitrag zur Beantwortung der gestellten Frage leisten zu können, so beruht das zunächst auf einem Zufall. Auf einem weiten Umwege, durch die Messung der kritischen Periode der rotierenden Scheiben, gelangte ich zu einer Formel für die Unterschieds-

---

daraufhin auch Proportionalität zwischen Reizen und Empfindungen zu vermuten . . .« (cit. Werk. S. 363). Mit dieser apriorischen »Vermutung« ist die Sache abgethan; aus derselben im Verein mit den bereits festgestellten Definitionen folgt nun ganz einfach: »dafs Deutungen des Weberschen Gesetzes in der Zukunft überhaupt entbehrlich werden.« (S. 402.) Das werden sie ganz sicher; nur erübrigt noch ein kleiner Schritt — wie es mir wenigstens vorkommt. Möglicherweise wird der geehrte Verfasser denn auch zugeben, dafs in der Wissenschaft zwischen »vermuten« und »darthun« doch ein kleiner Unterschied ist. Es bleibt den Empirikern also noch die Aufgabe zurück, darzuthun, dafs die »Vermutungen« des Philosophen richtig waren. Gesetzt nun aber, sie erwiesen sich als falsch? Dann wäre es wohl eigentlich ganz glücklich, wenn es dem Philosophen nicht gelänge, jemand zu überzeugen, da dies den Fortschritten der Wissenschaft nur hinderlich sein würde.

empfindlichkeit, die nicht nur mit den vorliegenden Messungen auf dem Gebiete des Lichtsinnes in Übereinstimmung zu sein schien, sondern sich leicht auch so erweitern liefs, dafs sie auf anderen Sinnesgebieten Gültigkeit erhielt. Und als ich hierauf — ebenfalls ganz zufällig — fand, dafs dasselbe Gesetz an einem ganz anderen Punkte, nämlich für die Abhängigkeit der Muskelarbeit von den zentralen Innervationen, gültig ist, glaubte ich ein physiologisch-dynamisches Fundamentalgesetz vor mir zu haben, das über zahlreiche psychophysische Probleme ein unerwartet klares Licht verbreitete. Diese verschiedenen Untersuchungen werden im Folgenden auseinandergesetzt werden. Sie bilden allerdings eine lange Einleitung zum Probleme von einem physischen Mafse der Bewufstseinszustände, da dieses aber die Lösung der anderen Probleme voraussetzt, läfst dies sich nicht ändern.

DIE KRITISCHE PERIODE DER ROTIERENDEN SCHEIBEN.

Die kritische Periode und die Unterschiedsempfindlichkeit. Läfst man eine Scheibe mit abwechselnd schwarzen und weifsen Sektoren mit zunehmender Geschwindigkeit um eine Achse durch ihr Zentrum rotieren, so werden die schwarzen Sektoren scheinbar immer schmäler, indem sich das Licht von den weifsen über dieselben verbreitet. Bei einer gewissen Geschwindigkeit erhält sich nur ein ganz schmaler, schwarzer Streifen an der Grenze zwischen den Sektoren, und nimmt die Geschwindigkeit noch ferner zu, so verbreitet das Licht sich auch über die schmalen Streifen, so dafs diese allmählich immer heller werden. Zuletzt zeigen die dunklen Sektoren sich nur als ein schwacher Flimmer auf einem sonst einfarbigen, helleren Grunde, und indem der Flimmer bei immer zunehmender Rotationsgeschwindigkeit immer heller wird, läfst er sich zuletzt nicht mehr vom Grunde unterscheiden,

so dafs die Scheibe sich nun völlig einfarbig zeigt. Diejenige Zeit, während welcher ein Punkt der Scheibe in dem Augenblicke, da der letzte Flimmer verschwindet, eine Winkelbewegung von gerade 360° ausführt, hat man die kritische Periode der Scheibe genannt. Aus der Weise, wie die Scheibe sich bei zunehmender Rotationsgeschwindigkeit der Einfarbigkeit nähert, sieht man leicht, dafs die kritische Periode von der Unterschiedsempfindlichkeit des beobachtenden Auges abhängig ist. Unter ganz unveränderten physischen Verhältnissen wird ein schärferes Auge den schwachen Flimmer länger zu verfolgen vermögen als ein weniger scharfes Auge, und folglich mufs die kritische Periode in ersterem Falle kürzer werden (da gröfsere Rotationsgeschwindigkeit erfordert wird) als in letzterem. Die kritische Periode mufs also, unter vielem anderen, auch von der Unterschiedsempfindlichkeit des Beobachters abhängig sein.

Die Messung der kritischen Periode der rotierenden Scheibe bereitet keine besondere Schwierigkeit; sie erfordert nur einen geübten Beobachter und die notwendigen genauen Instrumente. Zugleich ist man im stande, in sehr grofsem Umfange die Helligkeit der Sektoren zu variieren, indem man schwarze, weifse und verschiedene graue Sektoren benutzen und die Scheiben bei verschiedener Beleuchtung betrachten kann. Es läfst sich also ohne Schwierigkeit ein so grofses Versuchsmaterial herbeischaffen, dafs man im stande ist, eine mathematische Formel für die Abhängigkeit der kritischen Periode von der Gröfse und der Art der Sektoren aufzustellen. Hat man eine solche genaue Formel gefunden, so mufs man aus dieser einen Ausdruck für die kritische Periode ableiten können, unter der Voraussetzung, dafs die rotierenden Sektoren anfangs nur einen ebenmerklichen Unterschied zeigten. Die auf diese Weise abgeleitete Formel wird, da die kritische Periode sich auch für diese Fälle messen läfst, als einzige Unbekannte die Unterschiedsempfindlichkeit enthalten; sie wird mit anderen Worten der bisher vergeblich gesuchte genaue Ausdruck des Weberschen Gesetzes.

In einer früheren Abhandlung: «Skelneloven. En Korrektion af Webers Lov og den Ebbinghaus'ske

Kontrastlov« (Das Unterscheidungsgesetz. Eine Berichtigung des Weberschen Gesetzes und des Ebbinghausschen Kontrastgesetzes)[1] veröffentlichte ich eine Reihe derartiger Untersuchungen. In dieser 12 Jahre alten Arbeit wies ich nicht nur alle diejenigen Gesetzmäfsigkeiten nach, die Marbe viel später, aber von mir unabhängig, fand[2], sondern ich erzielte auch die mathematische Formel für die Abhängigkeit der Periode von der Gröfse der Sektoren und eine entsprechende, jedoch unvollständige Formel für die Abhängigkeit der Periode von der Helligkeit der Sektoren. Aus letzterer Formel leitete ich ferner, auf oben angedeutete Weise, einen Ausdruck für das Webersche Gesetz ab, der mit grofser Annäherung die auf verschiedenen Gebieten gemessenen Werte der Unterschiedsempfindlichkeit umfafst. Dafs ich bisher keine Sorge dafür getragen habe, diese Arbeit einem weiteren Kreise als dem von der dänischen Sprache begrenzten zugänglich zu machen, hat seinen Grund ausschliefslich darin, dafs meine Formeln unvollständig waren und mich nicht befriedigten. Da die Sache jetzt aber, aus den in der Einleitung entwickelten Gründen, für mich sozusagen aktuelles Interesse erhielt, nahm ich diese alten Untersuchungen wieder auf. Alle Messungen wurden durch sorgfältigere Versuche kontrolliert, und letztere wurden aufserdem in gröfserem Umfange variiert, so dafs es mir möglich war, die vollständigen, bisher von mir vermifsten Formeln aufzustellen. Die folgende Darstellung wird daher keineswegs nur ein Wiederabdruck meiner früheren Arbeit, deren Existenz indes eine wesentliche Bedingung war, damit es mir überhaupt gelingen konnte, diese Untersuchungen bis zu einem relativen Abschlusse durchzuführen. Hier werden diese Versuche und deren Resultate nun in möglichster Kürze auseinandergesetzt werden.

---

[1] Schriften der Kgl. Dänischen Akademie der Wissenschaften. 6. Reihe, hist.-phil. Abt. II, 6. Köbenhavn. 1889.

[2] Marbe, Zur Lehre v. d. Gesichtsempfindungen. Phil. Stud. IX. Leipzig 1894. Theorie des Talbotschen Gesetzes. Phil. Stud. XII. Leipzig 1896. Neue Versuche über intermittierende Gesichtsreize. Phil. Stud. XIII. Leipzig 1898.

Material und Anordnung der Versuche. Zur Darstellung der rotierenden Scheiben benutzte ich die Heringschen grauen Papiere des Mechanikers Rothe in Leipzig. Ich zog es indes vor, statt des schwarzen zu dieser Reihe gehörenden Zeugpapiers ein mit Neutralschwarz bestrichenes Papier anzuwenden, da die Anwendung eines bestimmten Farbstoffes mir gröſsere Garantie zu bieten schien, daſs dieselbe Nüance des Schwarz sich fortwährend herstellen lieſse. Als Weiſs wurde reines Zinkweiſs angewandt. Da die grauen Papiere übrigens gar zu wenige Schattierungen des Hellgrau enthielten, stellte ich die erforderlichen Zwischenglieder durch Bemalung mit Mischungen von Zinkweiſs und Neutralschwarz dar[1]. Auf diese Weise verschaffte ich mir eine Reihe von 39 verschiedenen Papieren, die einen ziemlich sanften Übergang aus Schwarz in Weiſs bildeten. Die relative Helligkeit dieser 39 Papiere wurde auf gewöhnliche Weise möglichst genau bestimmt. Hierauf wurden 7 derselben so gewählt, daſs die Helligkeit eines jeden möglichst nahe das Doppelte der Helligkeit des zunächst vorangehenden dunkleren Papiers betrug. In der Tab. 1, deren erste Kolonne die Laufnummer der Papiere, die zweite unter der Überschrift *L* die gemessenen Helligkeiten angibt, sind die

---

[1] Wenn man quantitativ verfährt, hat man die Sicherheit, stets dieselben Schattierungen wieder darstellen zu können. Ich wäge 20 gr Zinkweiſs ab und reibe dieses auf einem Stein mit 21 ccm einer 15%haltigen Lösung reinen Fischleims bis zu einer ganz gleichförmigen Masse. Dann werden verschiedene abgewägte Mengen Neutralschwarz zugesetzt. Schon 1 mgr bringt merkbare Verdunkelung hervor. Eine Reihe eben merklich verschiedener Schattierungen kann man darstellen, wenn man 1, 2, 5, 9, 14, 20, 27, 35, 44, 54, 65 u. s. w. mgr Neutralschwarz als Zusatz zu 20 gr Zinkweiſs nimmt. Die Wahl des Papiers hat jedoch groſsen Einfluſs; ich gebrauchte starkes, glattes Papier (dänisches Normal No. 424). Die Farbe wird mit Pinseln aus Iltishaaren in langen regelmäſsigen Strichen aufs Papier gebracht; dieses liegt ein paar Minuten zum Trocknen, worauf es noch einmal senkrecht zur vorigen Strichrichtung bestrichen wird. Mit demselben Pinsel, der zum Anstreichen gebraucht wurde, glättet man nach. Auf diese Weise erhält man eine matte, völlig ebene und gleichfarbige Fläche; da der Leim sehr zäh ist, haftet die Farbe gut. Die angegebene Stoffmenge genügt zum Anstreichen von 2000 cm^2 Fläche, von einem Bogen in Medianformat. Die Farbentöne stimmen mit denen der Heringschen Papiere gut überein.

7 erwähnten Papiere durch einen Stern hervorgehoben. Endlich wurden 5 andere Schattierungen etwas dunkler als die erstgenannten, diesen jedoch möglichst nahe liegend, gewählt; nur für das reine Weifs wurde eine Reihe von 4 naheliegenden Schattierungen genommen. Im ganzen wurden bei den Versuchen, aufser Schwarz und Weifs, also 14 verschiedene Schattierungen des Grau benutzt. Überdies wurde ein lichtloser, auf die von Kirchmann beschriebene Weise hergestellter Raum benutzt[1].

Tab. 1.

No.	*L*	Helligkeit		
		2 Lampen in		kl. Lampe
		31,6 cm	316 cm	in 316 cm
39	* 57,55	1 841 600	18 416	184
38	56,06	1 793 920	17 939	
37	51,74	1 655 680	16 557	166
36	46,63	1 492 160	14 922	149
34	42,47	1 359 040	13 590	136
31	* 30,84	986 880	9 869	99
30	29,27		9 366	
25	* 18,75	600 000	6 000	60
24	16,86		5 395	
20	* 9,80	313 600	3 136	31
19	9,48		3 034	
15	* 4,77	152 640	1 526	15
14	4,46		1 427	
6	* 2,88	92 160	922	9
3	1,62		518	
1	* 1,00	32 000	320	3

Um die Versuche in möglichst grofsem Umfange variieren zu können, wurden sie bei verschiedener Beleuchtung ausgeführt. Hierzu wurden zwei Petroleumlampen mit Sonnenbrennern angewandt, die zur Flammenhöhe 5 cm reguliert wurden; ihre gesamte Lichtstärke war dann die von 32 engl. Normalkerzen. Zu sehr schwacher Beleuchtung wurde eine kleine Petroleumlampe mit fadenförmigem Docht benutzt, deren Flammenhöhe sich merkwürdig konstant erhielt; sie wurde auf

[1] Phil. Stud. Bd. V. S. 294.

eine Lichtstärke von 0,32 Normalkerzen reguliert, also gerade auf 1/100 der Lichtstärke, welche die beiden grofsen Lampen zusammen abgaben. Um nun die bei verschiedener Beleuchtung unternommenen Messungen miteinander vergleichen zu können, wird es am besten sein, alle angewandten Helligkeiten durch eine gemeinsame Einheit auszudrücken. Zur Einheit wählte ich die Helligkeit eines Stückchens neutralschwarzen Papiers, von einer einzigen Normalkerze in einer Entfernung von 10 m beleuchtet. Denkt man sich diese Normalkerze in die Entfernung von 31,6 cm vom Papier versetzt, so wird dessen Helligkeit also $\frac{1000^2}{31{,}6^2} = 1000$ mal so grofs, und bringt man in der genannten Entfernung die beiden grofsen Petroleumlampen an, so wird folglich die Helligkeit des schwarzen Papiers 32000. Multipliziert man also die in der Tab. 1 angegebenen relativen Helligkeiten *(L)* mit 32000, so erhält man die Helligkeit der betreffenden Papiere bei der angegebenen Beleuchtung; diese Zahlen sind in der dritten Kolonne der Tab. 1 angeführt. Werden die Lampen nun bis zu einer Entfernung von 316 cm vom Papier gestellt, so wird dessen Helligkeit um 100 mal geringer als vorher; die Helligkeit der verschiedenen Papiere erhält man einfach durch Division der vorhergehenden Zahlen mit 100, und diese Zahlen sind in der nächstletzten Kolonne der Tab. 1 angegeben. Nimmt man endlich die kleine Lampe statt der beiden grofsen, so verringert man wieder die Beleuchtung und somit die Helligkeiten bis auf 1/100 der vorigen; die korrespondierenden Zahlen sind in der letzten Kolonne der Tab. 1 angegeben, wo übrigens, wie ebenfalls in den anderen Kolonnen, nur diejenigen Helligkeiten angeführt sind, die thatsächlich zur Anwendung kamen. Wie aus der Tabelle zu ersehen, gelang es mir durch diese Kombination verschiedener Beleuchtungen und farbiger Papiere eine Reihe von Helligkeiten zur Verfügung zu bekommen, in der sich nirgends grofse Sprünge finden, und deren äufserste Glieder sich zu einander verhalten wie 3 zu ungefähr 2 Millionen. Der Reizumfang ist somit über 600000.

Da die Messungen innerhalb dieses ganzen Gebietes angestellt werden sollten, liefs sich voraussehen, dafs

die kritische Periode sehr verschiedene Werte erhalten würde. Es kam daher darauf an, zum Hervorbringen der Rotation der Scheiben einen Motor zu finden, dessen Geschwindigkeit sich einerseits innerhalb sehr weiter Grenzen einigermafsen leicht variieren liefs, und der sich anderseits, wenn er erst einmal eingestellt war, längere Zeit hindurch konstant erhielt. Nach vielen vergeblichen Versuchen, die Erfüllung beider dieser Forderungen durch Maschinenkraft zu erzielen, kam ich zu dem Resultate, dafs der am leichtesten anwendbare, sicherste und zuverlässigste Motor meine eigene Hand sei. Da eine Darstellung der verschiedenen mifslungenen Versuche mit Wassermotoren und Uhrwerken wohl kein Interesse darbietet, beschränke ich mich darauf, die Anordnung zu beschreiben, bei welcher ich schliefslich blieb.

Der Rotationsapparat wurde mittels einer Kurbel in Bewegung gesetzt, und von dieser wurde die Bewegung ausschliefslich durch Zahnräder auf die Achse übertragen, welche die Scheiben trug. Die Zahnradverbindung war so eingerichtet, dafs eine Umdrehung der Kurbel 30 Umdrehungen der Scheibenachse bewirkte. Um eine gleichmäfsige Bewegung zu sichern, war an der Scheibenachse ein schweres Schwungrad, 31 cm im Durchmesser, angebracht; der Radkranz war durch vier äufserst dünne, schwarz angelaufene stählerne Stangen mit der Nabe verbunden. Diese wurden während der Rotation durchaus unsichtbar und störten deshalb niemals die Beobachtung; überdies wurden sie gewöhnlich von den Scheiben verdeckt, aber selbst wenn sie, wie in einzelnen Versuchen, unverdeckt an dem lichtlosen Raum vorübergingen, konnte die reflektierte Lichtmenge ganz unbeachtet bleiben, weil sie gar zu gering war, um gemessen werden zu können. Bei den gröfsten Umdrehungsgeschwindigkeiten war dieses Schwungrad übrigens überflüssig, weshalb es durch einen kleinen Windflügel ersetzt wurde, den die Scheiben ganz verdeckten, und der also auch keine Störungen bewirken konnte. Um nun genau messen zu können, wieviel Zeit jede Umdrehung der Kurbel beanspruchte, waren an deren Achse zwei Cylinder fest angebracht, einer aus Ebonit, der andere aus Messing; von letzterem

ging ein schmaler Streifen aus demselben Metall in den Ebonitcylinder hinein, in gleicher Höhe wie dessen Oberfläche. An diese beiden Cylinder drückten zwei Federn an, die mit den Poldrähten einer galvanischen Batterie in Verbindung gesetzt waren; in die Leitung war aufserdem ein Signalhammer eingeschaltet. Dreht man nun die Kurbel um, so wird die Leitung sich in dem Momente schliefsen, in welchem die eine Feder den in den Ebonitcylinder eingeführten Metallstreifen berührt, und der Signalhammer markiert also genau, wann eine Umdrehung der Kurbel oder 30 Umdrehungen der Scheibenachse stattgefunden haben. Zur Messung

Fig. 1.

der Umdrehungszeit benutzte ich eine für solche Versuche speziell konstruierte Uhr, die das Ablesen der Zeit mit einer Genauigkeit von 0,1 Sek. gestattete; die Uhr war so eingerichtet, dafs sie durch den Druck auf einen Knopf angehalten werden konnte und nach Aufhören des Druckes sogleich wieder in völlig regelmäfsigen Gang kam.

Selbstverständlich wurden alle Versuche im Dunkelzimmer ausgeführt. Auf einem soliden Tische stand hier der Rotationsapparat *R* (siehe Fig. 1) festgeschraubt; diesem gegenüber waren die Lampen *L* und L_1 angebracht. Letztere waren von schwarzen Cylindern umgeben, die nur an der Vorderseite, nach dem Rotationsapparate hin, eine passende Öffnung hatten. Neben den Lampen, 32 cm vom Rotationsapparate ent-

fernt, war in der Höhe der rotierenden Scheiben ein innen und aufsen schwarz angestrichener Kasten *K* angebracht, in dessen Boden sich ein mit Silber belegter geschliffener Spiegel befand. Der Beobachter safs so, dafs er durch eine Spalte im Schirme *S* die eine Hälfte der auf *R* angebrachten Scheibe im Spiegel sehen konnte, während er zugleich mit der rechten Hand auf bequeme Weise den Apparat in Gang zu erhalten vermochte. *N* ist der lichtlose Raum, ein fast ein Meter langer, innen schwarz angestrichener Kasten; dieser war, wie die Fig. zeigt, in schräger Stellung so angebracht, dafs der Beobachter im Spiegel nach dem Boden des Kastens hinsah, der von den Lampen fast gar kein Licht erhalten konnte. Die Dunkelheit war so total, dafs eine neutralschwarze Scheibe hellgrau erschien, wenn sie, sogar bei den schwächsten Beleuchtungen, gegen den lichtlosen Raum gesehen wurde. Da der Spiegel in *K* nur von der Scheibe am Rotationsapparate Licht erhielt, sonst aber durchaus nicht beleuchtet wurde, war er auch selbst unsichtbar; wenn man durch die Spalte in *S* blickte, konnte man sich kaum des Gedankens erwehren, man sehe direkt auf den Rotationsapparat hin. Mit Bezug auf die übrigen Anordnungen ist noch zu bemerken, dafs *P* ein Schirm mit einer Öffnung ist, die es gerade gestattet, dafs die Lampen, wenn sie in der Richtung des Pfeils bis zu einer Entfernung von 316 cm verschoben wurden, die Scheibe und weiter nichts zu beleuchten vermochten. *Q* ist ebenfalls ein Schirm, der das Licht der Blendleuchte *B* von den rotierenden Scheiben fernhält. Durch *B* wurde die Uhr *U* beleuchtet, die in solcher Entfernung vom Beobachter stand, dafs er leicht mit der linken Hand die Uhr anhalten konnte, während er durch die Spalte *S* sah und mit der rechten Hand den Rotationsapparat in Gang erhielt. Endlich war mittels verschiedener andrer Schirme dafür gesorgt, dafs das von den Wänden reflektierte Licht ferngehalten wurde, so dafs die Beleuchtung der Scheibe wirklich die aus der Entfernung der Lampen berechnete war.

Bei der Betrachtung der Scheiben im Spiegel geht natürlich ein wenig Licht verloren. Es ist jedoch ganz unnötig, deswegen die in der Tab. 1 angegebenen

Zahlen zu korrigieren, da die gewählte Einheit eine ganz willkürliche Gröfse ist. Behalten wir also die Zahlen unverändert, so wird nur die Mafseinheit so geändert, dafs sie die Helligkeit bezeichnet, die ein neutralschwarzes Papier hat, wenn es von einer Normalkerze in der Entfernung von 10 Meter beleuchtet und in einem Spiegel von gegebener Beschaffenheit betrachtet wird.

Die Ausführung der Versuche geht nun in allem Wesentlichen aus dem Gesagten hervor. Die gröfste Schwierigkeit bestand unbedingt darin, die Beleuchtung längere Zeit hindurch konstant zu erhalten. Obgleich eine mit gutem Brenner und wohlabgeputztem Docht versehene Petroleumlampe gewifs eine der ruhigsten Lichtquellen ist, die man kennt, mufste hier doch noch mehr verlangt werden, weil die zu messenden Erscheinungen eben von der Stärke der Beleuchtung in hohem Grade abhängig sind. Eine ganz geringe Variation der Flammenhöhe genügte, um sofort einen merkbaren Unterschied der Dauer der kritischen Periode zu bewirken. Es war deshalb notwendig, ungefähr jede Viertelstunde die Flammenhöhe zu messen, und wenn diese merkbaren Unterschied zeigte, mufsten die Lampen aufs neue durch Vergleich mit der Normalkerze reguliert werden. War die Beleuchtung in Ordnung, so gingen die Versuche übrigens leicht von statten. Jede Messung begann damit, dafs die Uhr angehalten und der Stand notiert wurde. Darauf wurde das Auge unbeschäftigt gelassen, um sich während einer Zeit, die von wenigen Sekunden bis 10 Minuten variierte, im Dunkel auszuruhen, damit es an die Beleuchtung, in welcher die Messung ausgeführt werden sollte, völlig adaptiert werden konnte. Man sieht leicht, dafs die Adaptation hier von allergröfster Wichtigkeit ist, da es sich darum handelt, bei einer häufig sehr schwachen Beleuchtung zu entscheiden, wann der letzte Flimmer auf der Scheibe verschwindet. Eine mangelhafte Adaptation verrät sich deshalb sogleich durch eine Verlängerung der kritischen Periode, und folglich ist es von Wichtigkeit, dafs alle im folgenden angegebenen Messungen nach äufsert sorgfältig durchgeführter Adaptation des Auges des Beobachters unternommen wurden. Da die Herstellung

dieser subjektiven Bedingung des genauen Messens eine nicht geringe Geduld erforderte, führte ich persönlich alle Messungen aus, und kann ich also Gewähr dafür leisten, dafs in jeglicher Beziehung alle mögliche Sorgfalt angewandt wurde. — Nach diesen Vorbereitungen wird der Rotationsapparat in Gang gesetzt, und sobald die rechte Geschwindigkeit erreicht ist, wird beim ersten Signal, das den Anfang einer neuen Umdrehung andeutet, das Anhalten der Uhr aufgehoben. Da der einmal in Gang gesetzte Rotationsapparat wegen seines schweren Schwungrads längere Zeit hindurch seine Geschwindigkeit unverändert zu behalten vermochte, hatte der Beobachter weiter nichts zu thun, als sich zu vergewissern, dafs die Geschwindigkeit stets die rechte und weder zu grofs noch zu gering war. Dies liefs sich leicht dadurch erreichen, dafs die Schnelligkeit einen Augenblick gehemmt wurde, so dafs sich auf der Scheibe ein schwacher Flimmer zeigte, worauf die Rotation sogleich wieder beschleunigt wurde, so dafs der Flimmer aufs neue verschwand. Auf diese Weise konnte man sich fortwährend ohne Schwierigkeit eben an der Grenze halten. Um übrigens den Fehler der Messungen möglichst klein zu machen, wurde die Kurbel bei jedem Versuche 5 mal umgedreht, und die abgelesene Zeit war also diejenige, während der die Scheibe $5 \cdot 30 = 150$ Rotationen ausgeführt hatte. Wird die Zeit nun mit der Genauigkeit von 0,1 Sek. abgelesen, so erhält man die einzelne Umdrehung der Scheibe mit der Genauigkeit 0,66 σ bestimmt; bei den meisten Versuchen kam obendrein nur $^1/_8$ der Dauer der einzelnen Scheibenumdrehung in Betracht, so dafs diese Zeit also mit einer Genauigkeit gröfser als 0,1 σ bestimmt ist.

Die Abhängigkeit der kritischen Periode von der Gradgröfse der Sektoren. Bei diesen Untersuchungen hatten die weifsen Sektoren konstant die Helligkeit 18416 (siehe Tab. 1), während die schwarzen Sektoren lichtlos waren. Dies wurde dadurch erzielt, dafs ein oder mehrere Sektoren von bestimmter Gradgröfse aus der Scheibe herausgeschnitten wurden, so dafs man durch diese Ausschnitte in den lichtlosen Raum hineinsah. Natürlich war es nicht thunlich, die Sektoren bis ganz ans Zentrum herauszuschneiden, da dies die

Scheibe so geschwächt haben würde, dafs sie sich während der Rotation nicht hätte plan erhalten können oder vielleicht sogar zerrissen worden wäre; ich wählte deshalb folgendes Verfahren. Die Scheiben hielten sowohl bei diesen als bei allen späteren Versuchen 10 cm im Radius. Um das Zentrum wurde mit einem Radius von 5 cm ein anderer Kreis geschlagen, und bis an diesen Kreis wurden die Sektoren ausgeschnitten. Die lichtlosen Sektoren bildeten auf diese Weise Strecken eines Kreisringes, dessen äufserer und innerer Radius 10 bezw. 5 cm waren. Diese Ordnung erwies sich als recht zweckmäfsig, denn wenn man während der Rotation einen Punkt ungefähr in der Mitte des Ringes fixierte, so verschwand der Flimmer fast zu gleicher Zeit in der ganzen Breite, wodurch bei der Beurteilung des rechten Moments nicht so wenig Unsicherheit vermieden wurde. Dieselbe Form der Scheiben wurde deshalb auch bei allen anderen Versuchen benutzt, wo die schwarzen Sektoren durch gefärbtes Papier vertreten waren, und wo es also nichts geschadet hätte, die Sektoren bis ganz ans Zentrum zu führen.

In der Tab. 2 ist eine Übersicht über die hier angewandten Scheiben gegeben. Unter N ist die Anzahl der Sektoren angeführt; unter s^0 und h^0 die Gradanzahl der schwarzen und der weifsen Sektoren. T ist der durch die Versuche gefundene Wert für die kritische Periode, in Tausendsteln Sekunden (σ) ausgedrückt. Die Tabelle zeigt, dafs die kritische Periode durchweg um so kürzer wird, in je weniger Sektoren die Scheibe geteilt ist. Bei 32 Sektoren z. B. ist $T = 600\,\sigma$, bei 2 Sektoren dagegen nur $42\,\sigma$. Aber auch bei konstanter Anzahl der Sektoren variiert T mit der Gradgröfse der schwarzen und weifsen Sektoren. Am deutlichsten geht dies aus der langen Versuchsreihe hervor, wo die Scheiben in 4 Sektoren von sehr wechselnder Gröfse geteilt waren. Man sieht hier, dafs T seinen kleinsten Wert ($85\,\sigma$) hat, wenn $s = h$ ist, und dafs T sowohl bei wachsenden als abnehmenden Werten von s von hier an zunimmt, am meisten jedoch bei abnehmenden Werten von s. Oder mit anderen Worten: T ist verhältnismäfsig am kleinsten, wenn die weifsen Sektoren am kleinsten sind. Dies ist ganz dasselbe, was Marbe

Tab. 2.

N	s^0	h^0	T	t_s	t_h	$t = \sqrt{t_s \cdot t_h}$
32	11,25	11,25	600	18,7	18,7	18,7
16	22,5	22,5	321	20,1	20,1	20,1
8	45	45	168	21,0	21,0	21,0
8	60	30	178	29,7	14,8	20,9
8	78,75	11,25	189	41,4	5,9	15,6
6	60	60	127	21,2	21,2	21,2
4	10	170	153	4,3	72,2	17,6
4	20	160	124	7,8	54,2	20,5
4	30	150	117	9,7	48,8	21,7
4	45	135	109	13,6	40,9	23,6
4	60	120	99	16,5	31,0	22,6
4	75	105	92	19,1	26,7	22,6
4	90	90	85	21,2	21,2	21,2
4	105	75	87	25,2	18,3	21,5
4	120	60	87	29,0	14,5	20,5
4	135	45	93	34,9	11,6	20,1
4	150	30	98	41,0	8,2	18,4
4	160	20	108	48,0	6,0	17,0
4	170	10	140	66,1	3,9	16,0
2	180	180	42	21,0	21,0	21,0

fand und durch folgenden Satz ausdrückte: »Aus den Tabellen ergibt sich, dafs einer gleichen Dauer der einzelnen Reize die geringste Gesamtdauer entspricht; mit wachsendem Unterschied der Dauer wächst auch die Gesamtdauer. Doch ist eine geringere Gesamtdauer erforderlich, wenn der intensivere Reiz der kürzere von beiden ist, als im umgekehrten Fall[1].«

In den Variationen der kritischen Periode ist es schwer, eine Gesetzmäfsigkeit zu erblicken, die sich mathematisch formulieren liefse. Eine solche tritt dagegen hervor, sobald man untersucht, wieviel Zeit auf die einzelnen Sektoren fällt. Bezeichnet man durch t_s und t_h diejenigen Zeiten, die ein schwarzer und ein weifser Sektor gebrauchen, um einen festen Punkt zu

[1] Phil. Stud. Bd. IX. S. 398.

passieren, wenn die Rotationszeit gerade die kritische Periode ist, so hat man:

$$t_s = \frac{T}{360} \cdot s \ldots \text{(Gleich. 8) und } t_h = \frac{T}{360} \cdot h \ldots \text{(Gleich. 9).}$$

Aus den Gleichungen 8 und 9 berechnet man leicht t_s und t_h, indem man die zusammengehörenden Werte von T, s und h einsetzt. Die auf diese Weise berechneten Werte sind in der Tab. 2 angeführt. Es zeigt sich nun, dafs das Produkt $t_s \cdot t_h$ beinahe konstant ist. Da es indes in mehreren Beziehungen bequemer sein wird, statt mit dem Produkte $t_s \cdot t_h$ mit dessen Quadratwurzel zu rechnen, so setzen wir:

$$t = \sqrt{t_s \cdot t_h} = \frac{T}{360} \sqrt{s \cdot h} \ldots \text{(Gleich. 10).}$$

Die Werte von t sind in der letzten Kolonne der Tab. 2 angeführt; man sieht, dafs sie fast konstant sind, unabhängig sowohl von der Anzahl als von der Gradgröfse der Sektoren. Diesen konstanten Wert werden wir im Folgenden die Periodenkonstante nennen. Natürlich variiert t mit der Helligkeit der Sektoren; unsere folgenden Untersuchungen bezwecken gerade, das Gesetz für diese Variationen zu finden. Ist t aber einmal für eine Kombination von zwei beliebigen Helligkeiten gefunden, so läfst sich hieraus die kritische Periode T für alle gegebenen, zusammengehörenden Werte von s und h mittels der Gleich. 10 berechnen. Für $s = h$ nimmt diese Gleichung übrigens die einfache Form an:

$$T = \frac{360}{s} \cdot t = \frac{360}{h} \cdot t = N \cdot t \ldots \text{(Gleich. 11).}$$

Eine nähere Betrachtung der in der Tab. 2 angeführten Werte für t zeigt indes, dafs t nicht durchaus konstant ist, indem die vorkommenden Variationen nicht ausschliefslich als zufällige Fehler zu betrachten sind. Die längste Versuchsreihe ($N = 4$) zeigt deutlich, dafs die Fehler nach einer gewissen Regel eintreten; t hat hier ein Maximum (23,6) bei $s = 45^0$, und von hier nehmen die Werte nach beiden Seiten gleichmäfsig ab. Eine ähnliche Variation sieht man schon in der kurzen Versuchsreihe $N = 8$. Hier ist also noch eine Aufgabe für

künftige Untersuchungen: das Gesetz für diese Variationen von t zu finden. Wenn ich mich hierauf nicht eingelassen habe, ist dies ausschliefslich dadurch begründet, dafs die Lösung dieses Problems für den Zweck, den ich mir aufgestellt habe, durchaus keine Bedeutung hat. Im Folgenden bekommen wir gar keinen Gebrauch für den Einflufs der Gröfse der Sektoren auf die kritische Periode; uns genügt es also, zu wissen, dafs man letztere annähernd berechnen kann, wenn die Periodenkonstante bekannt ist, und dafs es für die Bestimmung der Konstanten ziemlich gleichgültig ist, welche Gröfse man den Sektoren gibt. Jedoch müssen diese bei allen Versuchen natürlich von gleicher Gröfse sein, da die Periodenkonstante hiervon nicht absolut unabhängig ist.

Die Abhängigkeit der Periodenkonstante von der Helligkeit der Sektoren. Bei diesen Untersuchungen hatten die Scheiben die oben (S. 31) erwähnte Form und Gröfse. Aus praktischen Gründen, damit die gemessenen kritischen Perioden weder zu lang noch zu kurz würden, war jede Scheibe in 8 gleich grofse Sektoren geteilt, deren jeder also 45^0 betrug. Laut Gleich. 11 findet man in diesem Falle die Periodenkonstante aus der gemessenen kritischen Periode ganz einfach durch Division mit $N = 8$. Auf diesen Scheiben waren die hellen Sektoren, deren Helligkeit im Folgenden als R angegeben wird, in allen Fällen aus den in der Tab. 1 mit * gezeichneten Papieren hergestellt. Dieselben 7 Papiere, aufser dem lichtlosen Raum, wurden in den meisten Fällen auch zu den dunklen Sektoren benutzt, deren Helligkeit wir künftig durch r bezeichnen. Man hat also fortwährend $r < R$. In einzelnen bestimmten Fällen, wo es darauf ankam, zwischen der Helligkeit der dunklen und der der hellen Sektoren einen möglichst geringen Unterschied zu haben, wurden auch die anderen in der Tab. 1 angeführten Papiere in Gebrauch genommen; diese benutzte ich aber stets nur zu den dunkleren Sektoren. Eine Übersicht über sämtliche untersuchte Kombinationen nebst den gefundenen Periodenkonstanten gibt Tab. 3. In der obersten Reihe ist hier die Gröfse R der Helligkeit der hellen Sektoren angeführt, in der ersten Kolonne links die Helligkeit r

Tab. 3.

$R =$ / r	1 841 600	986 880	600 000	313 600	152 640	92 160	32 000	18 416	9 869	6 000	3 136	1 526	922	320	184	99	60	31	15
1 793 920	45,0																		
1 655 680	20,6																		
1 492 160	17,0																		
1 359 040	15,3																		
986 880	14,6																		
600 000	13,5																		
313 600	12,8																		
152 640	11,8																		
92 160	11,2																		
32 000	10,9																		
17 939								59,4											
16 557								41,3											
14 922								33,9											
13 590								31,9											
9 869								28,0											
9 366									45,8										
6 000								26,3	31,8										
5 395										43,6									
3 136								23,9	28,3	33,5									
3 034											56,6								
1 526								22,5	25,8	29,8	37,0								
1 427												62,3							
921								22,1	24,6	28,0	33,7	41,8							
518													47,9						
320								21,6	23,3	26,3	29,5	31,3	39,2						
166															∞				
149															61,7				
136															51,6				
99															45,4				
60															41,6				
31															38,7				
15															36,8				
9															36,0				
3															35,1				
0	10,7	12,2	13,0	14,3	15,8	17,4	19,2	21,0	22,4	24,7	27,5	29,3	30,8	32,2	34,3	35,0	36,1	38,2	41,3

der dunklen Sektoren. An den Schneidepunkten der wagerechten Reihen und der senkrechten Kolonnen stehen die für diese Kombinationen gefundenen Periodenkonstanten angeführt, wie vorher in Tausendsteln Sekunden ausgedrückt. In der untersten Reihe sind z. B. die Werte angeführt, welche die Periodenkonstante erhält, wenn man als schwarze Sektoren den lichtlosen Raum ($r = 0$) und als helle Sektoren die 19 verschiedenen, hierzu benutzten Helligkeiten (von $R = 15$ bis $R = 1\,841\,600$) gebraucht. Übrigens zerfällt die Tabelle in 3 Gruppen, den drei verschiedenen Beleuchtungen entsprechend, deren Anwendung hier notwendig war, um die ganze Reihe von Helligkeiten hervorzubringen. Bei der stärksten Beleuchtung wurde nur eine einzige Reihe von Versuchen unternommen mit $R = 1\,841\,600$ und mit 10 verschiedenen Werten von r; bei der schwächsten Beleuchtung ebenfalls nur eine einzige Reihe mit $R = 184$ und mit 9 verschiedenen Werten von r. Diese Begrenzung ist ausschliefslich der Rücksicht auf meine Augen zu verdanken. Die schwächste Beleuchtung strengte das Auge entschieden an und erforderte sehr lange Adaptationszeit, so dafs eine Erweiterung der Versuche eine im Verhältnis zur Genauigkeit der Messungen unziemlich lange Zeit gekostet haben würde. Die stärkste Beleuchtung war so kräftig, dafs sie fast blendend wurde, weshalb ich mich auch hier auf die möglichst geringe Anzahl von Messungen beschränkte. Die mittlere Beleuchtung dagegen war, sowohl was Zeit als Anstrengung betrifft, für die Arbeit die angenehmste, und es wird sich später denn auch erweisen, dafs die hier durchgeführten 6 Versuchsreihen unbedingt die genauesten sind.

Wenn wir nun versuchen sollen, für die Abhängigkeit der Periodenkonstanten von R und r ein mathematisch formuliertes Gesetz zu finden, fällt es am natürlichsten, mit dem speziellen Falle zu beginnen, wo $r = 0$ ist, da hier nur eine einzige Variable, R, sein kann und infolgedessen die Verhältnisse am leichtesten überschaulich sind. Es ist denn auch nicht schwer, die Gesetzmäfsigkeit dieser Zahlenreihen zu gewahren. Während nämlich die angewandten Werte von R annähernd als geometrische Reihe anwachsen, in welcher

jedes Glied fast doppelt so grofs als das zunächst vorhergehende ist, sieht man, dafs die entsprechenden Werte von t in arithmetrischer Reihe abnehmen, in welcher die Differenz zwischen zwei aufeinander folgenden Gliedern so ziemlich 1,5 ist. Da wir im Folgenden fortwährend für diejenigen Werte von t Gebrauch haben werden, welche $r = 0$ entsprechen, wollen wir diese durch τ bezeichnen. Nennen wir nun den Quotienten, mit welchem R wachsen mufs, damit τ um $1\,\sigma$ abnimmt, q, und bezeichnen wir ferner den $R = 1$ entsprechenden Wert von τ durch k, so haben wir folgendes Verhältnis zwischen R und τ:

$$R = 1 \;\ldots\; q \;\ldots\; q^2 \;\ldots\; q^3 \;\ldots\; q^n$$
$$\tau = k \;\ldots\; k-1 \;\ldots\; k-2 \;\ldots\; k-3 \;\ldots\; k-n.$$

Im allgemeinen hat man also: $R = q^n$, wenn $\tau = k - n$ ist.

Wird n aus letzterer Gleichung in erstere eingesetzt, und diese mit Bezug auf τ gelöst, so erhält man:

$$\tau = k - k_1 \log. R \;\ldots\ldots\; \text{(Gleich. 12)},$$

indem $k_1 = \dfrac{1}{\log. q}$ ist.

Um nun zu prüfen, ob diese Gleichung den gefundenen Werten von τ genau entsprechend sei, bestimmte ich mittels der Methode der kleinsten Quadrate die Werte von k und k_1, durch die in der Tab. 3 angegebenen 19 Werte von τ. Man findet hierdurch $k = 47{,}6$ und $k_1 = 6{,}035$, also:

$$\tau = 47{,}6 - 6{,}035 \log. R \;\ldots\; \text{(Gleich. 13)};$$

setzt man in diese Gleichung nach und nach die verschiedenen Werte von R ein, und berechnet man die entsprechenden Gröfsen für τ, so erhält man die in Tab. 4 in der Reihe »τ ber.« angegebenen Zahlen. Diese werden hier mit den in Tab. 3 angegebenen Werten von τ zusammengestellt, und in der dritten Reihe sind die Abweichungen der gefundenen Werte für τ von den berechneten angeführt, indem $f = \tau$ gef. — τ ber.

(Siehe Tab. 4 S. 38.)

Wie man sieht, erreicht der Fehler nur an ganz einzelnen Stellen $1{,}0\,\sigma$, und der mittlere Fehler ist $0{,}65\,\sigma$. Eine so völlige Übereinstimmung der gefundenen Werte von τ mit den berechneten darf sicherlich als Beweis

Tab. 4.

R	1 841 600	986 880	600 000	313 600	152 640	92 160	32 000	18 416	9 869	6 000
τ gef.	10,7	12,2	13,0	14,3	15,8	17,4	19,2	21,0	22,4	24,7
τ ber.	9,8	11,4	12,7	14,4	16,3	17,6	20,4	21,9	23,5	24,8
f	+ 0,9	+ 0,8	+ 0,3	— 0,1	— 0,5	— 0,2	— 1,2	— 0,9	— 1,1	— 0,1

R	3136	1526	922	320	184	99	60	31	15
τ gef.	27,5	29,3	30,8	32,2	34,3	35,0	36,1	38,2	41,3
τ ber.	26,5	28,4	29,7	32,5	33,9	35,6	36,9	38,6	40,5
f	+ 1,0	+ 0,9	+ 1,1	— 0,3	+ 0,4	— 0,6	— 0,8	— 0,4	+ 0,8

betrachtet werden, dafs zwischen τ und R wirklich das durch Gleich. 12 ausgedrückte logarithmische Abhängigkeitsverhältnis besteht.

Wir schreiten darauf zur Untersuchung, wie t mit r variiert, wenn R konstant ist. Um dies zu bestimmen, besitzen wir 8 Versuchsreihen, unter denen wir vorläufig doch nur die drei ausführlichsten, nämlich R = 1 841 600, 18 416 und 184, in Betracht nehmen wollen. Diese drei Zahlen haben den Quotienten 100, und da dasselbe für alle in den drei Reihen benutzten Werte von r gilt, entsprechen die gefundenen Zeiten in allen drei Reihen denselben Werten von R/r. Dies erleichtert die Übersicht. Ebenfalls ist es von Bedeutung, dafs diese drei Versuchsreihen fast gleich viele Werte von t (10, 10 und 8) enthalten; bei einer eventuellen Berechnung von Konstanten können wir dann die drei Reihen unter einem nehmen, während wir genötigt geworden wären, den verschiedenen Reihen verschiedenes Gewicht beizulegen, wenn sie eine gar zu verschiedene Anzahl von Versuchen enthalten hätten. Wir haben also Grund genug, vorläufig nur die drei genannten Reihen zu betrachten, die in der Tab. 5 so zusammengestellt sind, dafs sie eine leichte Übersicht gewähren. Die Tabelle zerfällt, den verschiedenen Werten von R entsprechend, in drei Abschnitte. In der ersten Kolonne links ist das Verhältnis R/r angegeben; die verschiedenen Werte dieser Gröfse sind, wie oben gesagt, den

drei Versuchsreihen gemeinschaftlich. In jedem Abschnitte der Tabelle sind die benutzten Gröſsen von r und die gemessenen Werte von t angegeben; darauf wird $t - \tau$ angeführt, indem für τ der durch die Versuche gefundene Wert dieser Gröſse, also für die drei Versuchsreihen 10,7 bezw. 21,0 und 34,3 genommen ist (vgl. Tab. 3).

Wir fanden oben, daſs zwischen τ und R ein logarithmisches Abhängigkeitsverhältnis stattfindet, indem r konstant ($= 0$) ist; die Annahme liegt deshalb nahe, daſs dasselbe für die Variationen des t mit r gelten wird, wenn R konstant ist. Eine Betrachtung der Tab. 5 zeigt jedoch sogleich, daſs dies nicht der Fall ist. Die niederen Werte von r in jeder Reihe bilden annähernd eine geometrische Progression, die entsprechenden Werte von t aber keineswegs eine arithmetische; man sieht, daſs t um so stärker anwächst, je mehr r sich R nähert. Da sich also keine augenfällige Gesetzmäſsigkeit zeigt, können wir über die Variationen des t mit r eine Kurve zeichnen, um eine Vorstellung davon zu erhalten, mit welcher Funktion wir hier zu schaffen haben. Ob wir hierbei t oder $t - \tau$ zur Ordinate nehmen, ist offenbar gleichgültig, da dies nur auf die Lage der Kurve im Verhältnis zur Abscissenachse, nicht aber auf deren Form Einfluſs erhält. Berechnet man daher die Gröſsen $t - \tau$ (vgl. Tab. 5), so sieht man, daſs diese in den drei verschiedenen Versuchsreihen für denselben Wert von R/r sehr nahe daran sind, gleich groſs zu werden, und es wird folglich das Natürlichste sein, die Gröſse R/r zur Abscisse zu nehmen. Daſs die drei Versuchsreihen indes nicht die nämliche Kurve ergeben, sieht man leicht, wenn man die Zeichnung in hinlänglich groſsem Maſsstabe ausführt. Man erhält drei deutlich gesonderte Kurven, die anscheinend gleichseitige Hyperbeln mit den Koordinatachsen als Asymptoten sind. Der dem Gipfel zunächst liegende Teil dieser drei Kurven ist Pl. I wiedergegeben. Die Abscissen gehen nur bis $R/r = 18$, die Ordinaten bis $t - \tau = 22$, dies ist jedoch genügend, da die weggelassenen Strecken der Kurven fast geradlinig und parallel sind. Einen guten Beweis, daſs die Form der Kurven nichts Individuelles, Zufälliges ist, hat man daran, daſs sowohl Kleiner als Marbe

zu ganz ähnlichen Kurven kamen, die auch nach dem Gutachten der genannten Forscher gleichzeitige Hyperbeln zu sein scheinen[1].

Tab. 5.

$\frac{R}{r}$	$R = 1\,841\,600$				
	r	t	$t-\tau$	C	C_1
1,027	1 793 920	45,0	34,3	35,2	0,9
1,11	1 655 680	20,6	9,9	11,0	1,1
1,23	1 492 160	17,0	6,3	7,8	1,5
1,36	1 359 040	15,3	4,6	6,3	1,7
1,86	986 880	14,6	3,9	7,3	3,4
3,07	600 000	13,5	2,8	8,6	5,8
5,88	313 600	12,8	2,1	12,4	10,2
12,06	152 640	11,8	1,1	13,3	12,2
19,98	92 160	11,2	0,5	10,0	9,5
57,55	32 000	10,9	0,2	11,5	11,3

$\frac{R}{r}$	$R = 18\,416$				
	r	t	$t-\tau$	C	C_1
1,027	17 939	59,4	38,4	39,4	1,0
1,11	16 557	41,3	20,3	22,5	2,2
1,23	14 922	33,9	12,9	15,9	3,0
1,36	13 590	31,9	10,9	14,8	3,9
1,86	9 869	28,0	7,0	13,0	6,0
3,07	6 000	26,3	5,3	16,3	11,0
5,88	3 136	23,9	2,9	17,1	14,2
12,06	1 526	22,5	1,5	18,1	16,6
19,98	922	22,1	1,1	22,0	20,9
57,55	320	21,6	0,6	34,5	33,9

$\frac{R}{r}$	$R = 184$				
	r	t	$t-\tau$	C	C_1
1,027					
1,11	166	∞			
1,23	149	61,7	27,4	33,7	6,3
1,36	136	51,6	17,3	23,5	6,2
1,86	99	45,4	11,1	20,7	9,5
3,07	60	41,6	7,3	22,4	15,1
5,88	31	38,7	4,4	25,9	21,5
12,06	15	36,8	2,5	25,3	27,7
19,98	9	36,0	1,7	34,0	32,3
57,55	3	35,1	0,8	46,1	45,2

[1] Marbe, Neue Versuche über intermittierende Gesichtsreize, Phil. Stud. Bd. XIII S. 107 u. f. Kleiners Arbeit war mir nicht zugänglich; ich kenne sie nur aus Marbes Citaten.

Es läſst sich indes leicht nachweisen, daſs wenigstens meine Kurven keine gleichseitigen Hyperbeln sind, wenn sie sich solchen auch sehr nähern. Für eine gleichseitige Hyperbel mit den Koordinatachsen als Asymptoten ist das Produkt der Abscisse und der Ordinate konstant. Unter genannter Voraussetzung sollte man also finden:

$$(t - \tau)\frac{R}{r} = C \quad \ldots\ldots \text{(Gleich. 14).}$$

In der Tab. 5 sind die Werte von C für alle drei Versuchsreihen angeführt. Man sieht, daſs C ziemlich stark variiert; in der ersten Reihe schwanken die Zahlen sogar von 6,3 bis 35,2, also bis zum Sechsfachen. Ganz so groſs sind die Schwankungen in den beiden anderen Versuchsreihen nun freilich nicht; daſs die Abweichungen jedoch nicht von einer Ungenauigkeit der Messungen herrühren, geht deutlich daraus hervor, daſs die Werte von C gesetzmäſsig variieren. In allen drei Versuchsreihen hat C ein zwischen $R/r = 1{,}36$ und $R/r = 1{,}86$ gelegenes Minimum, so daſs C von hier sowohl bei zunehmenden als abnehmenden Werten von R/r allmählich anwächst. Eine derartige übereinstimmende Regelmäſsigkeit in drei voneinander unabhängigen Versuchsreihen ist keine Zufälligkeit, und wir dürfen hieraus also schlieſsen, daſs die Pl. I dargestellten Kurven keine gleichseitigen Hyperbeln sind, und daſs Gleich. 14 die Variationen von t mit r nur annähernd richtig ausdrückt.

Eine Diskussion der Gleich. 14 wird uns noch mehr überzeugen, daſs dieselbe nicht richtig sein kann. Tab. 5 zeigt nämlich, daſs t stark anwächst, wenn r sich R nähert. Dies ist ganz in der Ordnung, denn je mehr die verschiedenen Sektoren nahe daran sind, dieselbe Helligkeit zu haben, um so geringer wird die Rotationsgeschwindigkeit sein, bei welcher sie zu einer einzigen Empfindung verschmelzen. Ist $r = R$, so wird die Scheibe ein völlig gleichförmiges Äuſseres darbieten, selbst wenn sie gar nicht rotiert, die Rotationszeit also unendlich wird. Folglich muſs Gleich. 14 für $r = R$ ergeben: $t = \infty$. Dies ist aber nicht der Fall. Löst man die Gleich. 14 mit Bezug auf t, so erhält man:

$$t = \tau + C\frac{r}{R} \quad \ldots\ldots \text{(Gleich. 15).}$$

Wird hier $r = R$ gesetzt, so wird $t = \tau + C$, was falsch ist, da τ eine endliche Gröfse ist, während man haben sollte $t = \infty$. Dagegen bekommt man aus Gleich. 15 für $r = 0$, dafs $t = \tau$ ist, was man auch haben sollte, da τ gerade als der Wert definiert wurde, den t annimmt, wenn $r = 0$ ist. (Vgl. S. 37). Die Absurdität, zu welcher Gleich. 15 führt, läfst sich vermeiden, wenn wir statt R/r die Gröfse $(R/r) - 1$ einführen und die Gleichung so schreiben:

$$(t - \tau)\left(\frac{R}{r} - 1\right) = C_1 \quad \ldots\ldots \text{(Gleich. 16).}$$

Hier wird $t = \tau$ für $r = 0$, und aufserdem wird $t = \infty$ für $r = R$, diese Gleichung wird aber nicht durch die gefundenen Werte von $t - \tau$ befriedigt. In Tab. 5 sind die Produkte C_1 für alle drei Versuchsreihen angeführt; man sieht, dafs C_1 mit dem Verhältnisse R/r regelmäfsig anwächst; C_1 ist also durchaus keine konstante Gröfse. Wir haben mit anderen Worten noch keinen genauen Ausdruck für die Variationen von t mit r; im Folgenden wird es unsere Aufgabe sein, diese Formel zu finden. Dafs es mir, meiner Meinung nach, gelungen ist, die Aufgabe zu lösen, verdanke ich wohl zunächst einem glücklichen Ungefähr. Betrachtet man die in der Tab. 5 angegebenen Werte von C_1, so sieht man, dafs sie mit dem Verhältnisse R/r zunehmen. Multipliziert man also die linke Seite der Gleich. 16 mit einem Bruche, der um so kleiner wird, je gröfser R/r ist, so mufs es gelingen können, das ganze Produkt konstant zu bekommen. Während meiner zahlreichen Bestrebungen, einen solchen Faktor zu finden, erwies es sich, dafs ein Bruch von der Form: $\dfrac{\beta}{\gamma + \log.\dfrac{R}{r}}$ diese Forderung annähernd erfüllte, so dafs man haben würde:

$$(t - \tau)\left(\frac{R}{r} - 1\right)\frac{\beta}{\gamma + \log.\dfrac{R}{r}} = C_2,$$

wo β, γ und C_2 Konstanten sind, deren Wert mittels der vorliegenden Messungen zu bestimmen sein wird. Dieser Bruch $\dfrac{\beta}{\gamma + \log.\dfrac{R}{r}}$ spielt aber in den Gesetzen für den

Helligkeitskontrast eine sehr wichtige Rolle. Es lag also nahe, zu versuchen, ob sich aus den Gesetzen für den Helligkeitskontrast nicht eine Formel für die Variationen von t mit r rationell ableiten liefse. Dies gelang wirklich, wie wir im Folgenden sehen werden.

Vorher kehren wir indes einen Augenblick zur Gleich. 14 zurück. Dafs sie nicht richtig ist und dies nicht sein kann, sahen wir bereits. Wendet man sie dennoch an, so begeht man aber doch wenigstens keinen grofsen Fehler, solange r sich nicht zu sehr dem R nähert, und solange R konstant ist. Aus Tab. 5 sieht man nämlich, dafs C in den drei Versuchsreihen nicht gleich grofs ist; die mittleren Werte von C in den drei Reihen sind 12,3, resp. 21,4 und 29,0. C ist also zweifelsohne eine Funktion von R, und folglich begeht man einen neuen Fehler, wenn man C als konstant und als von R unabhängig betrachtet. In meiner ersten Arbeit über diesen Stoff waren meine Messungen weder zahlreich noch genau genug, um zu zeigen, dafs die Gleich. 14 nicht befriedigt. Ich mufste sie deshalb als den richtigen Ausdruck für t betrachten, und indem die Gleichung mit Bezug auf t gelöst wird und man aus Gleich. 12 den Ausdruck für τ einsetzt, erhält man:

$$t = k - k_1 \log. R + C \frac{r}{R} \quad . \; . \; . \; . \; \text{(Gleich. 17).}$$

Von diesem Ausdrucke ging ich bei einer Reihe weitergehender Berechnungen aus, die also nur annähernd richtig sein können. Im Folgenden werden wir indes sehen, wie der richtige Ausdruck für t so kompliziert wird, dafs es gewöhnlich praktisch unthunlich ist, denselben anzuwenden, weshalb wir in mehreren Fällen genötigt werden, zur Gleich. 17 zurückzugreifen, die doch allenfalls brauchbar ist, selbst wenn sie keine so genauen Resultate gibt, wie man wünschen möchte.

DIE GESETZE DES HELLIGKEITSKONTRASTES.

Sieht man ein Objekt von der Helligkeit R gegen einen dunkleren Hintergrund von der Helligkeit r, so wird ein positiver Kontrast stattfinden, indem R eine induzierte (scheinbare) Helligkeit $J > R$ erhält. Die Gröfse des J ist bestimmt durch das zuerst von Ebbinghaus nachgewiesene Gesetz:

$$J - R = a\,(R - r) \;\ldots\ldots\; \text{(Gleich. 18)},$$

wo a eine Konstante ist. Hat man dagegen ein dunkles Objekt r auf einem helleren Hintergrunde R, so wird ein negativer Kontrast stattfinden, indem r die scheinbare Helligkeit $i < r$ erhält. Für die Abhängigkeit des i von r und R hat Ebbinghaus das Gesetz angegeben:

$$i - r = a_1\,(r - R)\,\frac{r}{R} \;\ldots\ldots\; \text{(Gleich. 19)},$$

wo a_1 ebenfalls eine Konstante ist; diese mufs, wenn die Gleichung in die hier angewandte Form gebracht wird, positiv sein, da sowohl $i - r$ als $r - R$ negativ ist.

Die Richtigkeit der beiden Gesetze, Gleich. 18 und Gleich. 19, legte Ebbinghaus mittels einer Reihe quantitativer Bestimmungen des Helligkeitskontrastes dar[1]. Die Versuche wurden mittels 52 grauer Papiere, die einen möglichst sanften Übergang aus tiefem Schwarz in reines Weifs bildeten, beim Tageslichte angestellt. Die Anordnung war übrigens dieselbe wie bei meinen ersten Kontrastmessungen[2]. Auf einen gegebenen Hintergrund J wurde eine Scheibe von derselben Helligkeit J gelegt; diese kleine Scheibe war also von jeglicher Kontrasteinwirkung völlig ausgeschlossen. Auf einem anderen, an J unmittelbar anstofsenden Hintergrunde r wurde nun eine hellere Scheibe, R, angebracht, deren Helligkeit so gewählt war, dafs sie wegen des Kontrastes mit r gleich J erschien. $J - R$ ist also gerade die durch den positiven Kontrast erzeugte Zu-

[1] Sitzungsberichte der Berliner Akademie. 1887. S. 1000.

[2] Phil. Stud. Bd. III S. 516.

nahme der Helligkeit des *R*. Ganz analog ist das Verfahren bei der Bestimmung des negativen Kontrastes. Eine Scheibe von der Helligkeit *i* wird auf einem Hintergrunde von derselben Helligkeit angebracht, und man sucht diejenige Scheibe *r*, die gegen den Hintergrund *R* gesehen gleich *i* erscheint. Die Gröfse $i - r$ wird dann das Mafs der Verminderung der Helligkeit.

Da die Versuchsanordnung in allem Wesentlichen bei Ebbinghaus' Messungen dieselbe war wie bei den meinigen, müfste man zu erwarten berechtigt sein, dafs auch meine Ergebnisse sich unter die beiden Gesetze einordnen liefsen. Wie Ebbinghaus angibt, stimmen meine Resultate allerdings mit Gleich. 18, dagegen aber nicht mit Gleich. 19 überein. Dieser Mangel an Übereinstimmung läfst sich freilich, wie Ebbinghaus meint, durch den Umstand erklären, dafs ein schwarzer Kasten während meiner Versuche eine nicht beabsichtigte und nicht ganz unbedeutende Kontrastwirkung herbeigeführt haben kann; es bleibt jedoch ein wenig rätselhaft, weshalb meine Resultate dennoch mit dem einen und gar nicht mit dem anderen Gesetze übereinzustimmen vermögen. Man müfste doch viel eher annehmen, dafs ein konstanter Faktor, wie der schwarze Kasten, einen konstanten Fehler der Resultate hervorbrächte, der sich als eine Abweichung in bestimmter Richtung von den Gesetzen erwiese. Die Möglichkeit ist also nicht ganz ausgeschlossen, dafs Gleich. 19 in der That nicht genau wäre. Und da Ebbinghaus selbst später die Richtigkeit dieses Gesetzes in Abrede gestellt hat[1], ohne es jedoch durch ein besseres zu ersetzen, müssen wir die Sache ins reine zu bringen suchen.

Vor allen Dingen ist nun zu bemerken, dafs sich in die Berechnung meiner Kontrastversuche ein Fehler eingeschlichen hat, der zwar nicht viel zu sagen hat, jedoch auch nicht ganz ohne Bedeutung ist. Zur Bestimmung der Helligkeit der verschiedenen Scheiben und Hintergründe ist es erforderlich, dafs wir das Ver-

---

[1] »Die Gesetzmäfsigkeit der Kontrastverdunkelungen ist komplizierter und noch nicht genügend klargestellt.« Ebbinghaus, Psychologie. Leipzig 1897. S. 223.

hältnis zwischen den Helligkeiten des angewandten Weifs und Schwarz kennen, und dieses Verhältnis war auf 68[1] angesetzt. In einer späteren Arbeit wies ich aber nach, dafs die zur Bestimmung dieser Zahl angewandte Methode unzuverlässige Resultate gibt, und dafs der genaue Wert 52 wird[2]. Hieraus folgt also, dafs alle meine in der genannten Arbeit über den Kontrast gemachten Angaben über die Helligkeit der benutzten Papiere unrichtig werden; in dem Ausdrucke für H (an cit. Orte S. 519) mufs 52 statt 68 gesetzt werden. Kommt es nun darauf an, zu prüfen, inwiefern die Ebbinghausschen Gesetze für meine Versuche gültig sind, so müssen selbstverständlich alle Berechnungen gemäfs der angegebenen Änderung der Konstanten korrigiert werden.

Wir untersuchen nun erst den positiven Kontrast. In der Tab. 6 habe ich die ausführlichste meiner früheren Versuchsreihen[3], auf die oben angeführte Weise umgerechnet, wiedergegeben, aufserdem in der Tab. 7 eine Versuchsreihe, die 1886 im Kopenhagener Laboratorium ganz ebenso wie die früheren ausgeführt wurde, also ebenfalls mit dem vom schwarzen Kasten herrührenden Fehler behaftet ist. Über den beiden Tabellen steht die Helligkeit r des konstanten Hintergrundes angegeben, und darauf die Namen der Beobachter. Von besonderem Interesse sind hier die in der letzten Kolonne jeder Tabelle angeführten, aus Gleich. 18 berechneten Werte von α. Man sieht nun, dafs α in Tab. 6 bei $R/r = 4{,}02$ ein Maximum hat, und von hier an allmählich, wenn auch nicht stark, an Gröfse abnimmt, indem R/r anwächst. In Tab. 7, die allerdings keinen so grofsen Umfang hat, dafür aber eine bedeutende Anzahl Messungen zwischen den Grenzen $R/r = 2{,}00$ und $R/r = 5{,}71$ mitteilt, zeigt sich dagegen nicht die geringste Andeutung eines Maximums bei $R/r = 4$; freilich variiert α etwas, die Schwankungen scheinen aber ganz zufällig zu sein und müssen von der Unsicherheit herrühren,

---

[1] An cit. Orte. S. 510.

[2] Über Photometrie mittels rotierender Scheiben. Phil. Stud. Bd. IV S. 238.

[3] Phil. Stud. Bd. III S. 522—523.

$r = 1,00$ Tab. 6. N. & L.

R	J	$J-R$	$\frac{R}{r}$	α
2,49	2,63	+ 0,14	2,49	0,094
4,02	4,83	0,81	4,02	0,269
5,54	6,68	1,14	5,54	0,251
9,80	11,79	1,99	9,80	0,226
13,35	16,05	2,70	13,35	0,219
16,19	19,46	3,27	16,19	0,215
20,60	24,57	3,97	20,60	0,203
25,14	29,97	4,83	25,14	0,200
31,35	36,93	5,58	31,35	0,183
37,78	43,60	5,82	37,78	0,158
45,31	52,00	+ 6,69	45,31	0,151

$r = 1,63$ Tab. 7. G, Lo & L.

R	J	$J-R$	$\frac{R}{r}$	α
3,26	3,67	+ 0,41	2,00	0,252
4,97	5,75	0,78	3,05	0,234
5,39	6,48	1,09	3,30	0,290
5,61	6,68	1,07	3,44	0,269
5,80	6,82	1,02	3,56	0,245
6,52	7,53	1,01	4,00	0,207
7,21	8,43	1,22	4,42	0,218
7,90	9,25	1,35	4,84	0,215
8,60	10,22	1,62	5,28	0,233
8,95	10,75	1,80	5,49	0,246
9,30	11,10	+ 1,80	5,71	0,235

die diesen Schätzungen in hohem Grade anhaftet. Man darf daher der Tab. 6 erscheinenden regelmäſsigen Variationen von α gewiſs kein zu groſses Gewicht beilegen. Und da hierzu kommt, daſs Hess und Pretori durch spätere Untersuchungen nach einer ganz anderen Methode die Richtigkeit des Gesetzes für den positiven Kontrast festgestellt haben[1], so ist Gleich. 18 mithin als dargelegt zu betrachten.

Anders verhält es sich dagegen mit dem Gesetze für den negativen Kontrast. Um mir ein auſser allen Zweifel gesetztes Versuchsmaterial zu verschaffen, benutzte ich ganz dasselbe Verfahren wie Ebbinghaus; ich brachte also kleine graue Scheiben unmittelbar auf

[1] Messende Untersuchungen über die Gesetzmäſsigkeit des simultanen Helligkeitskontrastes. Graefes Archiv f. Ophtalm. Bd. 40.

dem Hintergrunde an, mit welchem sie kontrastieren sollten. Hierdurch ist der Einfluſs fremder Faktoren natürlich weit sicherer ausgeschlossen als durch die Anwendung von Scheiben, die vor dem induzierenden Hintergrund rotieren, wobei der Ständer des Rotationsapparats, die Schraubenmutter im Zentrum der Scheiben und dergl. notwendigerweise ins Gesichtsfeld geraten und nicht zu berechnende Störungen herbeiführen. Bei den Versuchen nach der Ebbinghausschen Methode benutzte ich folgende einfache Anordnung. Auf einem Stücke planen Kartons, 5 mm dick und 24 × 36 cm im Viereck, wurden zwei Stücke Papier angebracht, deren jedes 18 × 24 cm hielt, und die im Verein also den ganzen Karton deckten. Diese Papiere von der Helligkeit *r* und *i* bildeten die Hintergründe. Auf diese wurden wieder kleine kreisförmige Scheiben von 6 cm im Durchmesser gelegt; ihre Entfernung von der Linie, wo die Hintergründe zusammenstieſsen, war konstant 4 cm. Über das Ganze legte ich hierauf eine Glasplatte von derselben Gröſse wie der Karton, an den sie mittels vier photographischer Kopieklammern, eine in jeder Ecke, fest angeklemmt wurde. Die kleinen Scheiben wurden hierdurch an der Stelle festgehalten, wo sie liegen sollten, so daſs man den ganzen Apparat senkrecht stellen konnte, und nachdem dieser in verschiedener Entfernung von den Lampen im Dunkelraum angebracht war, den Kontrast bei verschiedener Beleuchtung zu untersuchen vermochte. Die Messung des Kontrastes wurde übrigens auf die oben (S. 45) näher besprochene Weise ausgeführt.

Das erste Resultat der Versuche war dies, daſs die absolute Gröſse der Beleuchtung ohne Einfluſs auf den Kontrast ist. Bei starkem Tageslichte und bei den verschiedenen Lampen im Dunkelraum erhielt ich dieselben Resultate. Dagegen war es von groſser Wichtigkeit, daſs die Scheiben in konstanter Entfernung betrachtet wurden, denn der Kontrast wurde um so stärker, je kleiner der Gesichtswinkel war, unter welchem die Scheiben betrachtet wurden. Als geeignete Entfernung des Auges von den Scheiben wählte ich 60 cm; der Gesichtswinkel wurde hierdurch derselbe wie der, unter welchem die rotierenden Scheiben bei meinen früheren

Kontrastmessungen betrachtet worden waren, indem diese Scheiben 20 cm im Durchmesser waren und aus einer Entfernung von 200 cm beobachtet wurden. Übrigens führte ich nur eine einzige Versuchsreihe aus, da es sich sogleich ergab, dafs diese zu demselben Resultate führte wie meine älteren Kontrastmessungen. Die gefundenen Gröfsen sind in der Tab. 8 angegeben, über welcher die Helligkeit des induzierenden Hintergrundes R angeführt ist; die Helligkeit der reagierenden Felder r und die hierdurch induzierten Helligkeiten i finden sich in den beiden ersten Kolonnen angeführt. Unter der Überschrift α_1 sind die aus Gleich. 19 berechneten Werte gegeben. Vergleicht man nun diese Zahlen mit den entsprechenden der Tab. 9, welche die ausführlichste meiner früheren Versuchsreihen über den negativen Kontrast gibt, so sieht man, dafs α_1 in beiden Versuchsreihen auf durchaus übereinstimmende Weise variiert. Die absoluten Werte des α_1 sind in den beiden Reihen verschieden; dies kann uns aber nicht in Erstaunen setzen, denn selbst wenn der Gesichtswinkel für die reagierenden Felder derselbe gewesen ist, gibt es bekanntlich viele andere Faktoren, die auf die Gröfse des Kontrastes Einflufs üben. Schon der Umstand, dafs die verschiedenen zu vergleichenden Flächen in der einen Versuchsreihe in demselben Plan lagen, während sie sich in der anderen Reihe entschieden auseinandertrennten, kann genügen, um den weit stärkeren Kontrast in ersterer Reihe zu erklären. Der Unterschied zwischen den absoluten Werten des α_1 in den beiden Reihen ist daher ohne gröfsere Bedeutung; das Wesentliche ist hier, dafs α_1 nicht konstant ist und in beiden

$R = 57{,}55$ Tab. 8. L.

r	i	$i-r$	$\frac{R}{r}$	α_1	ber. α_1
53,9	46,6	— 7,3	1,07	2,11	2,02
51,7	42,5	9,2	1,11	1,73	1,97
44,6	29,3	15,3	1,29	1,52	1,79
38,2	16,9	21,3	1,51	1,66	1,62
29,3	9,5	19,8	1,96	1,37	1,42
21,6	4,5	17,1	2,66	1,28	1,23
8,3	1,6	6,7	6,93	0,97	0,87
4,8	1,0	— 3,8	11,99	0,84	0,76

R = 52,00 Tab. 9. N. & L.

r	i	$i-r$	$\frac{R}{r}$	α_1	ber. α_1
49,56	43,60	— 5,96	1,05	2,563	1,020
43,46	36,93	6,53	1,20	0,915	0,910
39,34	29,97	9,37	1,32	0,978	0,843
32,67	24,57	8,10	1,59	0,667	0,737
26,56	19,46	7,10	1,96	0,547	0,646
22,58	16,05	6,53	2,30	0,511	0,590
16,76	11,79	4,97	3,10	0,438	0,508
10,87	6,68	4,19	4,78	0,487	0,423
7,63	4,83	2,80	6,95	0,439	0,369
3,63	2,63	— 1,00	14,30	0,298	0,297

Reihen bei zunehmenden Werten des R/r sehr entschieden abnimmt. Dafs die Messungen an einiger Unsicherheit leiden, verrät sich deutlich dadurch, dafs mitten unter geringeren Werten des α_1 einzelne gröfsere vorkommen; die Variation ist also keine ganz gleichmäfsige; die sinkende Tendenz ist aber nicht zu verkennen. Da α_1 nach Gleich. 19 konstant sein sollte, dies aber thatsächlich nicht ist, so mufs die Gleich. 19 als unrichtig bezeichnet werden. Es findet sich aber doch bestimmte Gesetzmäfsigkeit in den Variationen von α_1, und es mufs möglich sein, dieses Gesetz zu finden. Es ist denn auch nicht schwer, nachzuweisen, dafs α_1 sich durch folgende Formel genau ausdrücken läfst:

$$\alpha_1 = \frac{\beta}{\gamma + \log. \frac{R}{r}}$$

wo β und γ Konstanten sind. Bestimmt man diese für jede der beiden Versuchsreihen für sich mittels der Methode der kleinsten Quadrate, so findet man

für Tab. 8: $$\alpha_1 = \frac{1,243}{0,5853 + \log. \frac{R}{r}}$$

und für Tab. 9: $$\alpha_1 = \frac{0,474}{0,4415 + \log. \frac{R}{r}}$$

Werden nun die verschiedenen Werte des R/r nacheinander in diese beiden Formeln eingesetzt, so läfst sich das entsprechende α_1 hieraus berechnen; diese Werte sind in den beiden Tabellen unter der Überschrift

»ber. α_1« angeführt. Die berechneten Werte von α_1 stimmen, wie man sieht, mit den gefundenen so gut überein, wie es bei der unsicheren Natur der Messungen nur zu erwarten stand. Es darf als hierdurch dargethan betrachtet werden, dafs für den negativen Kontrast folgende Formel gültig ist:

$$i - r = \frac{\beta}{\gamma + \log. \frac{R}{r}} \cdot \frac{r}{R} (r - R) \; \ldots\ldots \text{(Gleich. 20).}$$

Für unsere weiteren Untersuchungen wird also das durch Gleich. 20 ausgedrückte Gesetz im Verein mit Gleich. 18 die Grundlage bilden.

Bisher setzten wir voraus, dafs nur eines der beiden Felder durch den Kontrast verändert würde, während das andere, der Hintergrund, keine Änderung erlitte. Dies ist natürlich nur zum Teil richtig; der Hintergrund verändert sich ebenfalls ein wenig, ist er aber grofs im Vergleich mit dem reagierenden Felde, so wird seine Veränderung durch den Kontrast eine äufserst geringe. Es leuchtet indes ein, dafs die Genauigkeit unserer Messungen nicht dadurch geschädigt wird, dafs wir die Veränderung des Hintergrundes unberücksichtigt lassen. Erleidet das reagierende Feld z. B. einen positiven Kontrast, den wir messen, so erleidet gleichzeitig der Hintergrund einen negativen Kontrast, den wir nicht messen; die unternommene Messung wird aber ja doch darum nicht weniger genau, weil wir die andere anzustellen unterlassen. Sobald dagegen die Frage entsteht, wie grofs der ganze durch den Kontrast hervorgerufene Unterschied zwischen den beiden Feldern ist, mufs selbstverständlich die Kontrastveränderung beider Felder in Betracht gezogen werden. Dies kann aber auch keine Schwierigkeit bereiten, da wir das Gesetz für den positiven wie auch das Gesetz für den negativen Kontrast kennen. Wird R zu J, dessen Gröfse durch Gleich. 18 bestimmt ist, und gleichzeitig r zu i, dessen Gröfse durch Gleich. 20 ergeben ist, so wird die Differenz $R - r$ aufgefafst, als hätte sie die Gröfse $J - i$, die sich aus den beiden Gleichungen berechnen läfst. Ziehen wir Gleich. 20 von Gleich. 18 ab, so erhalten wir:

$$J - i - (R - r) = \alpha (R - r) + \frac{\beta}{\gamma + \log.\frac{R}{r}} \cdot \frac{r}{R} \cdot (R - r).$$

woraus folgt

$$J - i = (R - r) \left[1 + \alpha + \frac{\beta}{\gamma + \log.\frac{R}{r}} \cdot \frac{r}{R} \right] \quad \ldots \text{(Gleich. 21)}.$$

Man sieht also, dafs zwei gleichzeitige Gesichtsreize von der Helligkeit R und r, die räumlich so geordnet sind, dafs sie miteinander kontrastieren, des Kontrastes wegen wirken werden, als wäre ihr Unterschied gröfser, als er wirklich ist, und dafs man den scheinbaren Unterschied erhält, wenn man $R - r$ mit dem in der Gleich. 21 gegebenen Faktor multipliziert. Theoretisch ist die Sache also völlig klar; in der Praxis kann bei der Berechnung von $J - i$ eine Schwierigkeit entstehen, weil die Konstanten α, β und γ sich mit der räumlichen Ordnung von R und r verändern. Wir sahen oben, dafs schon ein einzelner kleiner Umstand, der die Kontrastwirkung erleichterte, sogleich eine Änderung der Konstanten herbeiführte. Hat man daher die Konstanten für den Fall bestimmt, wo das eine Objekt gegen das andere als Hintergrund gesehen wird, so lassen diese Konstanten sich nicht auf den Fall übertragen, wo die Objekte aneinandergrenzen und einander in entgegengesetzten Richtungen gleich stark induzieren. Man mufs mit anderen Worten jedesmal, wenn man neue Versuchsbedingungen einführt, auch die Konstanten aufs neue berechnen; ob diese aber grofs oder klein werden, ist für die Gültigkeit der Gleichungen 18 und 20 natürlich ohne Belang.

Wir schreiten jetzt zu dem Nachweis, wie wir mittels dieser Kontrastgesetze zu einem genauen Ausdruck für die Periodenkonstante gelangen können.

DIE PERIODENKONSTANTE UND DAS UNTERSCHEIDUNGSGESETZ.

Die Abhängigkeit der Periodenkonstante von dem Kontraste der Sektoren. Es war der Versuch, für die Periodenkonstante eine genaue Formel zu finden, der uns zur Untersuchung der Kontrastgesetze bewog; da dieser Punkt nun geordnet ist, kehren wir zur anfänglichen Frage zurück. Gibt es nun irgend eine Wahrscheinlichkeit, daſs eine Kontrastwirkung der Sektoren stattfinden kann, so daſs diese auf die kritische Periode der rotierenden Scheibe irgend einen Einfluſs zu üben vermöchte? Die Antwort hierauf wird offenbar davon abhängen, was in letzter Instanz die Ursache alles Kontrastes ist. Ist der Kontrast, wie Helmholtz[1] und Wundt[2] glauben, eine rein psychische Erscheinung, die darauf beruht, daſs wir kein absolutes Maſs für unsere Empfindungen haben, so daſs wir die Differenz zweier gleichzeitiger Empfindungen je nach den Umständen, unter denen diese sich darbieten, auf verschiedene Gröſse schätzen — so kann von einem Kontraste zwischen den Sektoren einer rotierenden Scheibe offenbar keine Rede sein. Denn der psychologischen Auffassung des Kontrastes zufolge muſs es für dessen Eintreten die unabweisbare Bedingung sein, daſs im Bewuſstsein wirklich zwei gesonderte Empfindungen gegeben sind, deren Unterschied geschätzt wird. Die verschiedenen Sektoren einer rotierenden Scheibe, die im Bewuſstsein zu einer einzigen Empfindung verschmelzen, sind folglich nicht im Besitze der notwendigsten Bedingung, um miteinander kontrastieren zu können. Es gibt aber noch eine andere Möglichkeit, die nämlich, daſs der Kontrast auf einer rein physiologischen Wechselwirkung zwischen zwei gleichzeitig gereizten Stellen der Netzhaut beruhen könnte. Ist diese Auffassung, die zuerst von Plateau und Hering aufgestellt wurde, und die vor kurzem an G. E. Müller einen Fürsprecher

---

[1] Physiologische Optik. 2. Aug. 1896. S. 543.
[2] Physiologische Psychologie. I⁴. 1893. S. 540.

gefunden hat[1], die richtige, so ist offenbar gar nichts im Wege, dafs zwischen den Sektoren einer rotierenden Scheibe Kontrastwirkung vorkommen kann. Denn während der Rotation der Scheibe wird jeder Punkt der Netzhaut kürzere oder längere Zeit hindurch von einem bestimmten Sektor Licht empfangen, und solange also auf zwei Punkte, *A* und *B*, Bilder zweier verschiedener Sektoren fallen, so lange mufs zwischen *A* und *B* auch die Wechselwirkung vorgehen, auf welcher der Kontrast beruht. Da der Kontrast, wie wir wissen, zur Folge hat, dafs der Unterschied zwischen den kontrastierenden Flächen gröfser erscheint, als er thatsächlich ist, so wird die Kontrastwirkung zwischen *A* und *B* sich folglich den Prozessen widersetzen, von denen die Verschmelzung der Sektorenbilder abhängig ist. Die Verschmelzung zu verhindern vermag der Kontrast natürlich nicht, aber selbst nachdem die Verschmelzung eine vollständige geworden ist, müssen zwischen den verschiedenen Stellen der Netzhaut doch noch immer Kontrastwirkungen vorgehen. So stellt sich die Sache, wenn der Kontrast ein in der Netzhaut verlaufender physiologischer Prozefs ist, und da diese Auffassung wohl sogar die überwiegende Wahrscheinlichkeit für sich hat[2], liegt also jedenfalls nichts Absurdes in dem Gedanken, dafs zwischen den Sektoren einer rotierenden Scheibe, obgleich sie nur eine einzelne Empfindung hervorrufen, Kontrastwirkungen vorgehen können. Wir gehen nun von dieser Voraussetzung aus, um zu untersuchen, welche Konsequenzen sie herbeiführt. Sollte es sich hierbei erweisen, dafs wir von der Annahme einer Kontrastwirkung zwischen den Sektoren aus zu einer befriedigenden Formel für die Periodenkonstante gelangen können, so wäre hierdurch zugleich ein schwer ins Gewicht fallender Beweis für die Richtigkeit der physiologischen Erklärung des Kontrastes geführt. Denn der psychologischen Auffassung zufolge wird die An-

---

[1] Zur Psychophysik der Gesichtsempfindungen. Zeitschr. für Psychol. u. Phys. der Sinnesorgane. Bd. 14. S. 25 u. f.

[2] Die Thatsachen zwingen mich zu diesem Eingeständnisse, obschon ich früher die psychologische Erklärung des Kontrastes für die natürlichere hielt.

nahme eines Kontrastes zwischen zwei Gröfsen, die für das Bewufstsein nicht jede für sich existieren, geradezu sinnlos sein.

Wir fanden oben (S. 42), dafs die Gleichung:

$$(t - \tau)\left(\frac{R}{r} - 1\right) = C_1 \ldots . \text{ (Gleich. 16)}$$

bei $r = 0$ und $r = R$ für t diejenigen Werte ergibt, welche man der Natur der Erscheinungen zufolge haben mufs, dafs die Gleichung sonst aber nicht durch die gefundenen Werte von t befriedigt wird. Nun wurde indes in der Gleich. 16 der möglicherweise vorkommende Kontrast der Sektoren untereinander nicht berücksichtigt. Bringt man nämlich die Gleichung in die Form:

$$(t - \tau)\left(\frac{R - r}{r}\right) = C_1 \ldots . \text{ (Gleich. 22)},$$

so sieht man, dafs sie nur die objektive Differenz $R - r$ enthält; soll also der Kontrast berücksichtigt werden, so mufs man statt $R - r$ die durch den Kontrast hervorgebrachte Differenz $J - i$ setzen, für die wir in Gleich. 21 einen Ausdruck haben. Wird dieser in die Gleich. 22 eingesetzt, so erhält man:

$$(t - \tau)\left(\frac{R}{r} - 1\right)\left[1 + \alpha + \frac{\beta}{\gamma + \log.\frac{R}{r}} \cdot \frac{r}{R}\right] = K \ldots \text{Gleich. 23)},$$

wo K eine Konstante ist. Es gilt nun, zu prüfen, inwiefern diese Gleichung durch die gefundenen, in der Tab. 5 angegebenen Werte für t befriedigt wird. Diese Probe ist indes mit gewissen Schwierigkeiten verbunden, da Gleich. 23 vier Konstanten, α, β, γ und K enthält, die wir nicht kennen, und deren wahrscheinliche Werte deshalb mittels der gefundenen Gröfsen von t bestimmt werden müssen. Nun ist der Ausdruck jedoch so kompliziert und findet γ sich hier auf solche Weise, dafs eine Bestimmung der Konstanten mittels der Methode der kleinsten Quadrate fast endlose Berechnungen erfordert. Ich bediente mich deshalb eines etwas kürzeren Verfahrens, wodurch ich damit davon kam, dafs das Rechnen mir nur ein paar Wochen kostete; die auf diese Weise gefundenen Konstanten sind aber nicht die wahrscheinlichsten Werte. Wir können deshalb aber

auch nicht erwarten, dafs zwischen Messung und Berechnung völlige Übereinstimmung stattfinden sollte, wenn wir die verschiedenen Werte von $t-\tau$ aus Gleich. 23 nach Einsetzung der Konstanten berechnen, und die Summe der Quadrate der Fehler wird nicht das Minimum. Die Übereinstimmung der Messung mit der Berechnung ist nichtsdestoweniger, wie wir sogleich sehen werden, eine sehr gute.

Für die Konstanten fand ich folgende Werte: $\alpha = 0{,}000$, $\beta = 0{,}942$, $\gamma = 0{,}0362$, während K von R abhängig ist und folglich für jede der drei Versuchsreihen verschiedenen Wert annimmt. So finde ich für $R = 1\,841\,600$ das $K = 11{,}64$; für $R = 18\,416$ das $K = 21{,}13$ und für $R = 184$ das $K = 32{,}48$. Werden diese Konstanten in die Gleich. 23 eingesetzt, so erhält diese folgende Form:

$$(t-\tau)\left(\frac{R}{r}-1\right)\left[1+\frac{0{,}942}{0{,}0362+\log.\frac{R}{r}}\cdot\frac{r}{R}\right]$$

$$=\begin{cases} 11{,}64 \text{ für } R = 1\,841\,600 \\ 21{,}13 \;\text{«}\; R = 18\,416 \quad \ldots\ldots \text{(Gleich. 24).} \\ 32{,}48 \;\text{«}\; R = 184 \end{cases}$$

Hieraus läfst sich nun $t-\tau$ berechnen durch successives Einsetzen der Werte für R/r. Man kommt auf diese Weise zu den Tab. 10 unter der Überschrift »$t-\tau$ ber.« angegebenen Werten. Übrigens ist die Tabelle wie Tab. 5 geordnet, indem sie in der ersten Kolonne die allen drei Reihen gemeinsamen Verhältnisse R/r gibt; darauf kommen die Werte von r und die entsprechenden gefundenen Werte von $t-\tau$. In der letzten Kolonne endlich sind die Abweichungen der gefundenen von den berechneten Gröfsen des $t-\tau$ unter f angegeben. Man sieht, dafs diese Fehler durchweg sehr klein sind; der durchschnittliche Fehler beträgt $1{,}5\sigma$, was als befriedigend zu betrachten ist, besonders unter Berücksichtigung der weniger genauen Weise, wie die Konstanten bestimmt wurden. Nur an zwei Stellen nimmt der Fehler eine bedenkliche Gröfse an, nämlich für $r = 149$, wo $f = +7{,}4$, und bei $r = 1\,793\,920$, wo er sogar bis $f = +13{,}0$ ansteigt. Diese bedeutenden Fehlergröfsen können die Übereinstimmung der Messung mit der Berechnung jedoch nicht zweifelhaft machen. Denn erstens ist in

Tab. 10.

$\frac{R}{r}$	$R = 1\,841\,600$			
	r	$t-\tau$	$t-\tau$ ber.	f
1,027	1 793 920	34,3	21,3	+ 13,0
1,11	1 655 680	9,9	9,3	+ 0,6
1,23	1 492 160	6,3	7,2	— 0,9
1,36	1 359 040	4,6	6,3	— 1,7
1,86	986 880	3,9	5,1	— 1,2
3,07	600 000	2,8	3,5	— 0,7
5,88	313 600	2,1	2,0	+ 0,1
12,06	152 640	1,1	1,0	+ 0,1
19,98	92 160	0,5	0,6	— 0,1
57,55	32 000	0,2	0,2	0,0

$\frac{R}{r}$	$R = 18\,416$			
	r	$t-\tau$	$t-\tau$ ber.	f
1,027	17 939	38,4	38,6	— 0,2
1,11	16 557	20,3	16,9	+ 3,4
1,23	14 922	12,9	13,0	— 0,1
1,36	13 590	10,9	11,5	— 0,6
1,86	9 869	7,0	9,3	— 2,3
3,07	6 000	5,3	6,4	— 1,1
5,88	3 136	2,9	3,6	— 0,7
12,06	1 526	1,5	1,8	— 0,3
19,98	922	1,1	1,1	0,0
57,55	320	0,6	0,4	+ 0,2

$\frac{R}{r}$	$R = 184$			
	r	$t-\tau$	$t-\tau$ ber.	f
1,027				
1,11	166	∞		
1,23	149	27,4	20,0	+ 7,4
1,36	136	17,3	17,7	— 0,4
1,86	99	11,1	14,2	— 3,1
3,07	60	7,3	9,9	— 2,6
5,88	31	4,4	5,5	— 1,1
12,06	15	2,5	2,8	— 0,3
19,98	9	1,7	1,7	0,0
57,55	3	0,8	0,6	+ 0,2

den Fehlern keine Spur von Regelmäſsigkeit; die erwähnten groſsen Fehler stehen durchaus isoliert da und sind nicht die äuſsersten Glieder einer Reihe immer zunehmender Fehler. Ferner ist es gerade aus der Natur

der Messungen zu verstehen, dafs wir eben an diesen Stellen die Gefahr laufen, grofse positive Fehler zu erhalten. Denn da das Verhältnis R/r hier sehr annähernd $= 1$ ist, finden wir also nur geringe Verschiedenheit der Helligkeit der Sektoren; der Unterschied war in der That kaum mehr als eben merkbar. Infolgedessen ist es sehr schwer zu entscheiden, wann der letzte Flimmer auf der Scheibe verschwindet, und läfst man, um keine gar zu grofse Rotationsgeschwindigkeit zu erhalten, von Zeit zu Zeit den Flimmer wieder entstehen, so ist es schwer, denselben zu erblicken, weshalb die Geschwindigkeit sehr gering gemacht werden mufs. Dies will mit anderen Worten aber nur heifsen, dafs der gemessene Wert der kritischen Periode, mithin die Periodenkonstante, gar zu grofs wird. Die Tab. 10 ist also als hinlänglicher Beweis für die Gültigkeit der Gleich. 24 zu betrachten.

Hierbei können wir jedoch nicht stehen bleiben. Denn Gleich. 24 enthält eine mit R variierende Konstante K, und wir müssen also K durch R auszudrücken suchen. Dies bietet nun auch keine gröfsere Schwierigkeit dar. Vergleicht man die in der Gleich. 24 angeführten Werte für K mit den entsprechenden für τ in Tab. 3, so sieht man, dafs hier fast völlige Übereinstimmung herrscht. Für $R = 1\,841\,600$ zeigt Tab. 3 $\tau = 10{,}7$, während wir $K = 11{,}64$ fanden: für $R = 18\,416$ hat man $\tau = 21{,}0$, während $K = 21{,}13$ ist; endlich für $R = 184$ ist $\tau = 34{,}3$ und $K = 32{,}48$. Die Abweichungen der verschiedenen korrespondierenden Werte von τ und K sind hier offenbar nicht gröfser, als dafs sie sich durch Beobachtungsfehler im Verein mit der weniger korrekten Bestimmung der Konstanten erklären lassen. Es wird deshalb doch allenfalls der Mühe wert sein, zu versuchen, ob wir nicht dadurch, dafs wir in Gleich. 23 τ statt K setzen, einen befriedigenden Ausdruck für t sollten erhalten können. Man erhält nun, indem die Gleichung mit Bezug auf t gelöst wird:

$$t = \tau \left[1 + \frac{1}{\left(\frac{R}{r} - 1\right)\left(1 + \alpha + \frac{\beta}{\gamma + \log.\frac{R}{r}} \cdot \frac{r}{R}\right)} \right]$$

Wird hierin der aus Gleich. 12 genommene Ausdruck für τ eingesetzt, so ist

$$t = (k - k_1 \log. R) \left[1 + \frac{1}{\left(\frac{R}{r} - 1\right)\left(1 + \alpha + \frac{\beta}{\gamma + \log. \frac{R}{r}} \cdot \frac{r}{R}\right)} \right]$$

. . . . (Gleich. 25).

Hier finden sich, wie man sieht, aufser Konstanten nur R und R/r, und wir haben also den vollständigen Ausdruck für t. Setzen wir die gefundenen Konstanten ein, so erhalten wir also:

$$t = (47{,}6 - 6{,}035 \log. R) \left[1 + \frac{1}{\left(\frac{R}{r} - 1\right)\left(1 + \frac{0{,}942}{0{,}0362 + \log. \frac{R}{r}} \cdot \frac{r}{R}\right)} \right]$$

. . . . Gleich. 26).

Wir prüfen nun die Richtigkeit der Formel mittels der fünf in Tab. 3 angeführten Versuchsreihen, die bisher noch gar nicht benutzt wurden. Da die Konstanten in Gleich. 26 ausschliefslich aus den anderen Versuchsreihen berechnet wurden, gibt es von der Gültigkeit der Gleichung in der That eine sehr gute Probe, wenn wir aus derselben die unter anderen Versuchsverhältnissen gefundenen Werte von t zu berechnen im stande sind. In der Tab. 11 sind die Ergebnisse dieser Berechnungen zusammengestellt. Die Tabelle zerfällt in fünf Gruppen, den fünf in der ersten Kolonne angeführten Werten von R entsprechend, mit denen die Versuche ausgeführt wurden. Unter der Überschrift »ber. τ« sind darauf die aus der Formel $\tau = 47{,}6 - 6{,}035 \log. R$ berechneten Werte angegeben. Diese bilden den einen, ausschliefslich von R abhängigen Faktor der Gleich. 26. In den drei folgenden Kolonnen sind r, R/r und die gefundenen, in der Tab. 3 angeführten Werte von t zu finden. In der nächstletzten Kolonne hat man die aus Gleich. 26 berechneten Werte von t, und endlich unter f die Abweichungen der gefundenen von den berechneten Gröfsen t.

Tab. 11.

R	τ ber.	r	$\frac{R}{r}$	t	t ber.	f
9869	23,5	9366	1,054	45,8	49,7	— 3,9
		6000	1,64	31,8	34,7	— 2,9
		3136	3,15	28,3	30,5	— 2,2
		1526	6,46	25,8	27,2	— 1,4
		921	10,71	24,6	25,7	— 1,1
		320	30,84	23,3	24,3	— 1,0
6000	24,8	5395	1,11	43,6	44,6	— 1,0
		3136	1,91	33,5	35,5	— 2,0
		1526	3,93	29,8	30,9	— 1,1
		921	6,51	28,0	28,6	— 0,6
		320	18,75	26,3	26,1	+ 0,2
3136	26,5	3033	1,034	56,6	66,3	— 9,7
		1526	2,05	37,0	37,4	— 0,4
		921	3,40	33,7	33,9	— 0,2
		320	9,80	29,5	29,3	+ 0,2
1526	28,4	1427	1,07	62,3	56,6	+ 5,7
		921	1,65	41,8	41,9	— 0,1
		320	4,77	34,3	34,3	0,0
921	29,7	518	1,77	47,9	43,2	+ 4,7
		320	2,88	39,2	39,2	0,0

Die Fehler sind, wie man sieht, durchweg sehr klein; der durchschnittliche Fehler beträgt 1,9 σ, was mir sehr befriedigend zu sein scheint. Überdies sind es hier wie in den anderen Versuchsreihen nur einige einzelne grofse Fehler, die den Durchschnittsfehler so stark in die Höhe treiben, und diese grofsen Fehler fallen ebenso wie vorher ausschliefslich auf diejenigen Werte des r, die sich dem korrespondierenden R so sehr nähern, dafs der Unterschied der Empfindung nahezu ebenmerklich wird. Hier müssen die Messungen daher notwendigerweise unsicher werden. Dafs die Fehler durchweg negativ sind, hat offenbar nicht viel zu bedeuten; dies deutet zunächst darauf hin, dafs die in Gleich. 26 aufgenommenen Konstanten nicht ganz genau sind — und das wissen wir ja vorher. Meines Erachtens ist die in der Tab. 11 gezeigte Übereinstimmung der Messung mit der Berechnung eine so gute, dafs die Gültigkeit der Gleich. 25 (26) als hierdurch erwiesen zu betrachten ist. Sind die Konstanten bestimmt, so kann man mittels dieser Gleichung also die Gröfse der Periodenkonstante

t für jeden beliebigen aufgegebenen Wert von R und r finden, und durch die Gleichungen 10 und 11 läfst sich darauf die kritische Periode T für alle gegebenen Gröfsen der Sektoren annähernd bestimmen.

Aufser diesem praktischen Resultate haben wir aber noch ein anderes von nicht unbedeutendem theoretischem Interesse gewonnen. Wir sahen, dafs sich in der Formel für die Periodenkonstante ein Faktor findet, der den Kontrast der Sektoren ausdrückt; erst als wir die Kontrastwirkung mit in Betracht zogen, kamen wir zu einer mit den Messungen übereinstimmenden Gleichung. Dies scheint mir notwendig zu folgendem Schlusse führen zu müssen:

Der Helligkeitskontrast ist ein wahrscheinlich in der Netzhaut verlaufender rein physiologischer Prozefs, der zu stande kommt, sobald verschiedene Stellen der Netzhaut ungleich stark beleuchtet werden; ob diese verschiedenen Beleuchtungen ebenfalls verschiedene Empfindungen hervorrufen, also als getrennte Felder von verschiedener Helligkeit aufgefafst werden, ist für das Eintreten des Kontrastes dagegen durchaus gleichgültig.

Da kaum anzunehmen ist, dafs zwischen dem Helligkeitskontraste und dem eigentlichen Farbenkontraste ein qualitativer Unterschied bestehen sollte, scheint hieraus mit Notwendigkeit hervorzugehen, dafs aller Farbenkontrast, im weitesten Sinne, auf einem rein physiologischen Prozesse beruht und davon unabhängig ist, ob die kontrastierenden Felder wirklich als getrennt aufgefafst werden.

Das Unterscheidungsgesetz. Im Anfange des Abschnittes »Die kritische Periode der rotierenden Scheiben« wurde nachgewiesen, dafs die kritische Periode, mithin auch die Periodenkonstante von der Unterschiedsempfindlichkeit des Beobachters abhängig ist. Es wird folglich besonderes Interesse haben, zu untersuchen, welche Werte t annimmt, wenn die Helligkeit der Sektoren, R und r, nur ebenmerklich verschiedene Empfindungen hervorruft. Ich suchte deshalb bei meinen Messungen des t in einer gröfseren Anzahl von Fällen

die Werte des t zu bestimmen, wenn der Unterschied der Sektoren ein nur ebenmerklicher war. Dies erwies sich aber als praktisch unthunlich. Erstens ist es fast unmöglich, die erforderlichen Papiere herbeizuschaffen. Die verschiedenen Sektoren müssen aus bemalten Papieren hergestellt werden, und nur ausnahmsweise gelang es mir, diese mit so grofser Genauigkeit auszuführen, dafs sie bei einer bestimmten Beleuchtung einen ebenmerklichen Unterschied zeigten. Deswegen erhielt ich nur ein wenig umfangreiches Versuchsmaterial, trotzdem eine unverhältnismäfsig lange Zeit zur Beschaffung der erforderlichen Papiere angewandt wurde. Ferner erwies es sich, was die vorhergehenden Untersuchungen bereits durch verschiedene Beispiele gezeigt hatten, dafs eine auch nur einigermafsen genaue Bestimmung der Periodenkonstante unmöglich wurde, wenn der Unterschied zwischen den Helligkeiten der Papiere so gering war. Wenn die Scheibe rotiert, erblickt man leicht die Verschiedenheit der Sektoren, selbst nachdem der dunklere Sektor bis zu einem ganz schmalen Streifen eingeschrumpft ist; es ist aber nicht möglich, mit Sicherheit zu entscheiden, wann dieser Streifen verschwindet, oder mit anderen Worten, wann die Scheibe ganz ohne Flimmer wird. Die Beurteilung wird durchaus unsicher, und nicht einmal der Durchschnitt einer gröfseren Anzahl Messungen wird zuverlässig, weil man sich schnell daran gewöhnt, auf bestimmte Weise zu schätzen, so dafs die einzelnen Messungen oft überraschend gut übereinstimmen. Darum kann man sich aber doch nicht auf das Resultat verlassen, wie aus den Tabellen 10 und 11 zu ersehen ist; kommt r ganz nahe an R, so zeigen sich die gemessenen Werte des t mit auffallend grofsen Fehlern behaftet, die gewöhnlich positiv sind, jedoch auch negativ werden können (siehe Tab. 11).

Durch direkte Messungen können wir also zu keinem bestimmten Ergebnisse mit Bezug auf die Werte gelangen, welche t annimmt, wenn der Unterschied der Sektoren ein ebenmerklicher ist. Darum ist es uns aber doch nicht verwehrt, über diese Sache ins reine zu kommen, denn diese Werte müssen sich aus Gleich. 26 berechnen lassen, wenn wir die Unterschiedsempfindlichkeit für verschiedene Gröfsen des R bestimmen. Das that ich

denn auch. Unter Anwendung desselben Materials, das zur Messung des t benutzt wurde, bestimmte ich meine Unterschiedsempfindlichkeit für sehr verschiedene Gröſsen des R. Eine Übersicht über die gefundenen Resultate ist in der Tab. 12 gegeben. In der ersten Kolonne ist R angeführt, in der nächsten Kolonne die entsprechenden Werte der Unterschiedsempfindlichkeit, durch das Verhältnis R/r ausgedrückt; in den beiden folgenden Kolonnen sind unter den Überschriften τ und B die Werte der beiden Faktoren gegeben, in die sich der Ausdruck für t (Gleich. 26) teilt. Man hat nämlich:

$$\tau = 47{,}6 - 6{,}035 \log. R \quad . \; . \; . \; . \; . \quad \text{(Gleich. 13)},$$

und setzt man daher

$$B = 1 + \frac{1}{\left(\frac{R}{r} - 1\right)\left(1 + \frac{0{,}942}{0{,}0362 + \log. \frac{R}{r}} \cdot \frac{r}{R}\right)}$$

so wird also: $t = \tau \cdot B$ . . . . (Gleich. 27). Die in der Tab. 12 unter der Überschrift t gegebenen Zahlen sind also, der Gleich. 27 gemäſs, die Produkte der in den Kolonnen τ und B angeführten Gröſsen.

Tab. 12.

R	$\frac{R}{r}$	τ	B	t	$\frac{60}{\tau}$	$\frac{R}{r}$ ber.
1 841 600	1,008	9,8	6,07	59,5	6,12	1,008
986 880	1,009	11,4	5,55	63,3	5,26	1,009
313 600	1,011	14,4	4,82	69,4	4,17	1,014
9 868	1,025	23,5	2,95	69,2	2,55	1,032
3 136	1,034	26,5	2,55	67,6	2,26	1,045
1 526	1,070	28,4	1,99	56,5	2,11	1,057
921	1,091	29,7	1,87	55,5	2,02	1,068
99	1,202	35,6	1,64	58,4	1,69	1,183
31	1,291	38,6	1,58	61,0	1,55	1,389
9	2,180	41,8	1,39	58,3	1,44	1,887

Betrachtet man die berechneten Gröſsen t, so erweisen diese sich als fast konstant. Allerdings zeigen die Zahlen einige Verschiedenheit, aber keine Spur einer gesetzmäſsigen Variation, indem die gröſsten und die kleinsten Werte unmittelbar aneinanderstoſsen. Die Abweichungen scheinen daher ausschlieſslich von Zu-

fälligkeiten herzurühren, von der unvermeidlichen Unsicherheit bei der Bestimmung der Unterschiedsempfindlichkeit R/r im Verein mit dem Umstande, daſs die in Gleich. 26 aufgenommenen Konstanten nicht die wahrscheinlichsten Werte sind. Ich halte es deshalb für berechtigt, aus den vorliegenden Messungen und Berechnungen den Schluſs zu ziehen, daſs t wirklich konstant ist. Oder mit anderen Worten:

Wenn zwischen den Sektoren einer rotierenden Scheibe nur ein ebenmerklicher Empfindungsunterschied stattfindet, so wird für einen gegebenen Beobachter die Periodenkonstante einen konstanten, von der absoluten Helligkeit der Sektoren unabhängigen Wert haben.

Hieraus folgt nun ganz einfach die Bedingung, damit zwei gleichzeitige Lichtreize, R und r, einen ebenmerklichen Empfindungsunterschied hervorrufen, nämlich:

$$t = (k - k_1 \log. R) \left[1 + \frac{1}{\left(\frac{R}{r} - 1\right)\left(1 + \alpha + \frac{\beta}{\gamma + \log. \frac{R}{r}} \cdot \frac{r}{R}\right)} \right] = K_1$$

. . . . . Gleich. 28),

wo K_1 eine Konstante ist. Werden hierin die früher gefundenen Konstanten eingesetzt und als der wahrscheinliche Wert $K_1 = 60$ genommen, so erhält man für die hier gefundenen Werte des R/r die Formel:

$$(47{,}6 - 6{,}035 \log. R) \left[1 + \frac{1}{\left(\frac{R}{r} - 1\right)\left(1 + \frac{0{,}942}{0{,}0362 + \log. \frac{R}{r}} \cdot \frac{r}{R}\right)} \right] = 60$$

. . . . . (Gleich. 29).

Löst man diese Gleichung mit Bezug auf R/r, so erhält man die in der Tab. 12 unter der Überschrift »ber. R/r« angegebenen Zahlen. Wie man sieht, weichen diese nur sehr wenig von den gefundenen R/r ab, und die Abweichungen sind ganz unregelmäſsig, indem einige Zahlen zu groſs, andere zu klein sind. Die Gleich. 29 gibt also wirklich mit groſser Annäherung die ver-

schiedenen Werte, welche die Unterschiedsempfindlichkeit dieses einzelnen Beobachters bei verschiedener Gröſse des R annimmt. Für andere Beobachter müssen in Gleich. 29 natürlich andere Konstanten aufgenommen werden, und somit werden auch die jedem gegebenen R entsprechenden Werte des R/r sich verändern.

Bevor wir weitergehen, wird es hier am Orte sein, in ein paar Worten zu erklären, wie man aus Gleich. 29 die jedem gegebenen R entsprechenden Verhältnisse R/r zu finden im stande ist. Da in der Gleichung nicht nur R/r, sondern auch r/R und log. (R/r) vorkommen, ist es natürlich unmöglich, aus derselben einen expliziten Ausdruck für R/r allein durch R und die Konstanten abzuleiten. Dies ist aber auch nicht notwendig, da man auf graphischem Wege R/r mit der gewünschten Genauigkeit ausmessen kann. Nach Gleich. 27 kann man Gleich. 29 in die Form: $\tau \cdot B = 60$ bringen, wo B die oben angegebene Bedeutung hat. Im Faktor B kommt aber nur R/r nebst verschiedenen Konstanten vor. Setzt man hierin also statt R/r eine Reihe verschiedener Werte, z. B. zwischen den Grenzen 1,005 und 2,200, ein, so kann man leicht berechnen, welche Werte B hierdurch annimmt, und diese zusammengehörenden Gröſsen R/r und B lassen sich graphisch abzeichnen. Dies ist in kleinem Maſsstabe Pl. II gezeigt. Als Abscissen sind hier die verschiedenen Werte des R/r, als Ordinaten die entsprechenden berechneten Werte des B abgesetzt. Die entstandene Kurve zeigt also, wie B mit R/r variiert, und folglich kann man an der Abscissenachse den jedem beliebigen Punkte der Kurve entsprechenden Wert des R/r ablesen. Dieses Ablesen läſst sich so genau machen, wie man wünscht, wenn man die Kurve nur in hinlänglich groſsem Maſsstabe zeichnet. Mittels dieser Kurve ist es nun nicht schwierig, die Gleich. 29 mit Bezug auf R/r zu lösen. Gibt man der Gleichung die Form: $\tau \cdot B = 60$, so ist B also $= 60/\tau$. In der Tab. 12 finden sich die den benutzten R entsprechenden Werte des τ, und dividiert man diese Gröſsen in 60, so erhält man die in der Kolonne $60/\tau$ angeführten Zahlen. Diese Zahlen sind mithin die verschiedenen Werte des B, und man braucht nun nur in der Kurve Pl. II diejenigen Punkte aufzusuchen, deren Ordinaten die Zahlen $B =$

$60/\tau$ sind; die entsprechenden Abscissen sind dann die gesuchten Werte des *R/r*. Im Pl. II entspricht 1 mm einem Unterschied von 0,01 in der Gröfse des *R/r*, und man kann daher noch eben einen Unterschied von 0,001 beurteilen; die Kurve, die ich zur Bestimmung der in Tab. 12 angeführten Zahlen für »ber. *R/r*« benutzte, war in viermal gröfserem Mafsstabe ausgeführt, so dafs die dritte Dezimale als zuverlässig betrachtet werden darf.

Die mathematische Formel, die das Abhängigkeitsverhältnis zwischen zwei Sinnesreizen ausdrückt, welche einen ebenmerklichen Empfindungsunterschied hervorrufen, werde ich im Folgenden der Kürze wegen mit dem Namen des »Unterscheidungsgesetzes« bezeichnen. Eine höchst unvollkommene Formulierung des Unterscheidungsgesetzes haben wir in dem aus dem Weberschen Gesetze abgeleiteten Ausdruck: R/r = konst. Wenn das Webersche Gesetz im Laufe der Zeit der Gegenstand einer so aufserordentlich grofsen Anzahl von Untersuchungen gewesen ist, so rührt das wahrscheinlich grofsenteils von der Einfachheit der genannten Formel her. Man konnte ruhig losexperimentieren, die Bearbeitung des Versuchsmaterials bereitete keine grofse Mühe, da sie nur ein Minimum von Berechnung erforderte. Alle diese Untersuchungen haben mit hinlänglicher Deutlichkeit dargethan, dafs die genannte Form des Unterscheidungsgesetzes durchaus ungenau ist; streng genommen hat sie sich nirgends als gültig erwiesen. Hierüber können wir uns nun nicht wundern, da wir in Gleich. 28 einen wenigstens annähernd genauen Ausdruck für das Unterscheidungsgesetz auf dem Gebiete des Lichtsinnes gewonnen haben. Dafs diese Formel indes nicht für alle Sinnesgebiete gilt, läfst sich schon jetzt mit Sicherheit vorhersagen. Denn es kommt in der Formel ein Faktor vor, welcher der Ausdruck für den gegenseitigen Kontrast der beiden gleichzeitigen Lichtreize ist. Auf den Gebieten anderer Sinne, z. B. auf dem des Gehörs, wo wir nicht mit gleichzeitigen Reizen operieren können, wird auch kein simultaner Kontrast stattfinden können, und folglich mufs der Ausdruck für die Kontrastwirkung aus der Formel entfernt werden. Dafür werden aber wahrscheinlich andere Momente auftreten, die ganz anderen

Gesetzen unterworfen sind, und die mit in Anschlag gebracht werden müssen, wenn wir auf diesen Gebieten eine genaue Formel für das Unterscheidungsgesetz suchen. Dafs das Webersche Gesetz sich also überall als unzulänglich erwiesen hat, rührt kurz und gut davon her, dafs es die Verhältnisse in gar zu grofsem Mafse vereinfacht. Wünscht man eine genaue Formel, so mufs man die vielen verschiedenen Momente, die auf den verschiedenen Sinnesgebieten zur Geltung kommen, mit in Betracht ziehen. Hieraus folgt aber wahrscheinlich, dafs man für jedes andere Sinnesgebiet einen speziellen Ausdruck für das Unterscheidungsgesetz erhält[1].

Dem sei nun, wie ihm wolle; streng genommen wird dadurch, dafs man ein und dasselbe Gesetz auf allen Gebieten gültig findet, doch nicht viel gewonnen sein. Weit schlimmer ist es, wenn die verschiedenen Formeln wahrscheinlich so kompliziert werden, dafs man ihre Gültigkeit meistens gar nicht zu prüfen im stande ist. Selbst wenn man auf anderen Sinnesgebieten auf Umwegen zu einer vollständigen Formel für das Unterscheidungsgesetz gelangen könnte, so wie es uns hier glückte, würde eine nähere Prüfung von deren Gültigkeit eine äufserst mühselige Arbeit werden. Mit Gleich. 28 vor Augen ist dies leicht zu verstehen. Dafs diese wirklich ein ziemlich genauer Ausdruck für die Variationen meiner individuellen Unterschiedsempfindlichkeit ist, vermochte ich nachzuweisen, weil die in der Gleichung vorkommenden Konstanten bekannt sind. Zu prüfen, ob das Gesetz auch für andere Beobachter gilt, über deren Unterschiedsempfindlichkeit Messungen vorliegen, wird aber so ziemlich unmöglich sein. Denn in der Gleich. 28 kommen nicht weniger als sechs Konstanten vor, und es ist anzunehmen, dafs sie alle mit der Versuchsperson variieren. Und mit Sicherheit wissen

[1] Für Schallempfindungen wird später eine spezielle Formel entwickelt werden. Was die Gewichtsempfindungen betrifft, mufs die Formel offenbar sehr kompliziert werden, wenn sie die generellen und typischen Tendenzen umfassen soll, die hier ähnlichen Einflufs üben wie der Kontrast auf dem Gebiete des Lichtsinnes. Vgl. L. Martin und G. E. Müller: Zur Analyse der Unterschiedsempfindlichkeit. Leipzig 1899.

wir jedenfalls, dafs diese Konstanten sich mit den Versuchsverhältnissen verändern. So sind die Konstanten k und k_1 von der Einheit abhängig, durch welche die angewandten Lichtreize ausgedrückt sind; diese Gröfsen variieren also mit dem absoluten Werte der Beleuchtung. Ferner sind α, β und γ von allen denjenigen Faktoren abhängig, welche auf die Gröfse des Kontrastes Einflufs haben, und K_1 wird dann wahrscheinlich von sämtlichen genannten Umständen im Verein abhängig sein. Nun kommen diese Konstanten in der Gleichung zugleich auf solche Weise vor, dafs ihre Bestimmung mittels der Methode der kleinsten Quadrate für eine vorliegende Reihe von Messungen über die Unterschiedsempfindlichkeit in der Praxis so gut wie unmöglich sein wird. Es eröffnen sich künftigen Forschern auf diesem Gebiete also keine besonders glänzenden Aussichten: diejenigen Gesetze, deren Gültigkeit sich prüfen läfst, erweisen sich als unrichtig, und diejenigen Gesetze, welche wahrscheinlich richtig sind, sind zugleich so kompliziert, dafs ihre Gültigkeit sich nicht prüfen läfst.

Für den Augenblick sehe ich mich deshalb nicht im stande, einen exakten Beweis dafür zu liefern, dafs Gleich. 28 wirklich für andere Beobachter gilt. Bedenkt man aber, auf welche Weise wir zu dieser Formel gelangten, so läfst sich an ihrer Gemeingültigkeit wohl kaum Zweifel erheben. Gleich. 28 ist nämlich ja nur der Ausdruck für die Periodenkonstante t (Gleich. 25), die sich in den speziellen Fällen, wo R und r ebenmerkliche Empfindungsunterschiede hervorrufen, gleich einer Konstanten erweist. Da meine Resultate mit Bezug auf die kritische Periode der rotierenden Scheiben mit dem übereinstimmen, was von der Hand anderer Forscher über diesen Punkt vorliegt, so ist Gleich. 25 zweifelsohne gemeingültig. Überdies ist es höchst wahrscheinlich, dafs man $t = K_1$ haben mufs, wenn zwischen den Sektoren ein ebenmerklicher Unterschied stattfindet. Denn ist der Unterschied zwischen den Sektoren ursprünglich ebenmerklich, so wird ein Minimum von Licht, das sich von dem helleren über den dunkleren Sektor verbreitet, hinlänglich sein, um ihren Unterschied unmerklich zu machen. Eine solche minimale Steigerung der Helligkeit des dunkleren Sektors mufs aber gerade

bei einer ganz bestimmten Rotationsgeschwindigkeit eintreten, die von der absoluten Helligkeit des helleren Sektors unabhängig ist. Es liegt also aller mögliche Grund für die Annahme vor, dafs der in der Gleich. 28 gegebene Ausdruck für das Unterscheidungsgesetz für Lichtempfindungen gemeingültig sein mufs. Und dies wird noch wahrscheinlicher, wenn man die Werte, welche andere Forscher für ihre Unterschiedsempfindlichkeit fanden, mit den meinigen vergleicht. Soweit mir bekannt, sind die beiden ausführlichsten bis jetzt vorliegenden Versuchsreihen dieser Art die von Aubert[1] und König[2] ausgeführten. Ein Vergleich der Resultate dieser beiden Forscher mit meinen eignen — sowohl den gefundenen als den berechneten — ist in der Tab. 13 gegeben.

Tab. 13.

R	Aubert	König	Lehmann	
			gef.	ber.
500 000		1,017		
200 000	1,007	1,018	1,008	1,008
100 000	1,008	1,018	1,009	1,009
35 000	1,010		1,011	1,014
20 000	1,015	1,018		
5 000	1,022	1,030		
1 000		1,042	1,025	1,032
600	1,030			
500		1,048		
350	1,037		1,034	1,045
100	1,040	1,093	1,091	1,068
10	1,091	1,282	1,202	1,183
5	1,125	1,377		
3,5			1,291	1,389
1	1,333	1,700	2,180	1,887

[1] Physiologie der Netzhaut. Breslau 1865. S. 62.

[2] König und Brodhun, Experimentelle Untersuchungen über die psychophysische Fundamentalformel. 2. Mitteilung. Sitzungsberichte der Akademie zu Berlin. 1889. Vgl. Helmholtz, Physiologische Optik. 2. Aufl. 1896. S. 408. Da Brodhuns Messungen in allem Wesentlichen dasselbe Resultat ergaben wie die von König angestellten, führe ich hier nur die eine Versuchsreihe an. Sonderbar ist es, dafs die maximale Unterschiedsempfindlichkeit beider genannten Forscher weit hinter dem zurücksteht, was andere gefunden haben. Dies scheint zunächst anzudeuten, dafs die angewandte Versuchsanordnung trotz des sinnreichen photometrischen Apparats dennoch nicht ganz zweckmäfsig war. Vgl. Simon, Über die Wahrnehmung von Helligkeitsunterschieden. Zeitschr. f. Psych. Bd. 21. S. 440.

Eine kleine Schwierigkeit beim Vergleich bereitet der Umstand, dafs die Einheit, von der man bei der Bestimmung der Lichtstärke ausging, bei allen drei Versuchsreihen eine verschiedene ist, und wir besitzen nicht einmal hinlängliche Daten, um diese Einheiten auf ein gemeinschaftliches Mafs zu reduzieren. Dies ist glücklicherweise aber auch nicht nötig, da es nur darauf ankommt, die Variationen der Unterschiedsempfindlichkeit mit der Lichtstärke, nicht aber deren Gröfse bei gegebener absoluter Intensität des Lichtes einem Vergleich zu unterwerfen. Für alle drei Versuchsreihen nahm ich deshalb als Einheit den niedrigsten Wert des R, bei welchem eine Messung ausgeführt wurde, und reduzierte demgemäfs die Zahlen. Alle Angaben Auberts über R sind daher mit 5 dividiert, Königs Angaben mit 50 multipliziert und meine eignen mit 9 dividiert; die unter der Überschrift R in der Tab. 13 gegebenen Gröfsen sind also nur Quotientzahlen. Die Tabelle zeigt uns also, wie die Unterschiedsempfindlichkeit bei den drei Beobachtern variierte, indem die Lichtstärke von der niedrigsten angewandten Gröfse an bis zur 5-, 10-, 100- u. s. w. fachen Stärke anwuchs. Und diese Variationen der Unterschiedsempfindlichkeit haben bei den drei Beobachtern einen im ganzen so gleichartigen Verlauf, dafs es wohl keinen Zweifel erleiden kann, dafs Gleich. 28, nur mit geringer Veränderung der Gröfse der Konstanten, für sie alle gültig ist.

Hierzu ist jedoch noch eins zu bemerken. König dehnte seine Messungen der Unterschiedsempfindlichkeit bis zu einer Gröfse des R aus, die 100 mal gröfser ist als der höchste in der Tab. 13 angegebene Wert. Hierdurch findet er, dafs die Unterschiedsempfindlichkeit anfangs einige Zeit hindurch konstant ist, worauf sie bei den höchsten Intensitäten wieder abnimmt. Es ist eine längst bekannte Sache, dafs die Unterschiedsempfindlichkeit ihr Maximum keineswegs bei der höchsten Lichtstärke hat, die das Auge überhaupt ertragen kann, sondern bei einer bedeutend geringeren Intensität. Diese Abnahme der Unterschiedsempfindlichkeit bei sehr grofsen Werten des R geht nicht aus Gleich. 28 hervor, die bei anwachsendem R zu immer mehr abnehmenden

Werten des R/r, mithin zu fortwährender Steigerung der Unterschiedsempfindlichkeit führt. Gleich. 28 ist insofern also unrichtig oder unvollständig. Der Grund hierfür liegt natürlich darin, daſs der Ausdruck für die Periodenkonstante t, aus welchem die Gleichung abgeleitet wurde, auch bei sehr groſsen Werten des R keine richtigen Werte des t gibt. Daſs ich die Untersuchungen nicht bis zu maximalen Gröſsen des R durchführte, geschah jedoch mit gutem Bedacht. Bei den groſsen Lichtstärken, wo die Unterschiedsempfindlichkeit abzunehmen beginnt, treten nach meinen persönlichen Erfahrungen stets die eigentümlichen Empfindungen ein, die man in der täglichen Rede die »Blendung des Auges« nennt. Worauf diese »Blendung« und die begleitenden unangenehmen oder sogar schmerzlichen Blendungsempfindungen eigentlich beruhen, das wissen wir nicht; nähere Untersuchungen darüber scheinen nicht vorzuliegen. Helmholtz sagt hierüber nur: »Die Abweichung von dem (Weberschen) Gesetze an der oberen Grenze könnte man mit Fechner wohl darauf schieben, daſs das Organ zu leiden anfängt. Die inneren Veränderungen im Nerven, welche den Eindruck des Reizes auf das Gehirn übertragen, können eben eine bestimmte Gröſse nicht überschreiten, ohne das Organ zu schädigen, und jeder Wirkung des Reizes ist daher eine obere Grenze gesetzt, welcher ein Maximum der Empfindungsstärke entsprechen muſs[1].«

Die Richtigkeit dieser Bemerkungen läſst sich wohl kaum bezweifeln. Sie stimmen ganz mit meinen Beobachtungen überein, daſs die Abnahme der Unterschiedsempfindlichkeit von unangenehmen Blendungsempfindungen begleitet wird, welche andeuten, daſs das Gesichtsorgan unter den gewaltigen Reizen leidet. Das Organ vermag die von ihm verlangte Arbeit nicht zu leisten; die physiologischen Prozesse verlaufen nicht mehr auf dieselbe Weise wie bei schwächeren Reizen. Unter den veränderten Verhältnissen kann man aber nicht erwarten, daſs ein Gesetz, das sich bisher als gültig erwies, seine Gültigkeit behalten sollte. Indem neue Momente hinzutreten, müssen diese, nach be-

---

[1] Physiologische Optik. 2. Aufl. 1896. S. 390.

stimmten Gesetzen, in die vorher bestehenden Verhältnisse störend eingreifen. Die Richtigkeit dieser Betrachtungen werde ich später auf einem ganz anderen Gebiete darlegen, wo wir, ohne gröfseren Schaden anzurichten, die Wirkungen zu untersuchen vermögen, die sehr nahe an der Grenze des dem Organismus Erträglichen liegen. Hier hebe ich dies nur hervor, um darauf aufmerksam zu machen, dafs ich die Unvollständigkeit der in Gleich. 28 gegebenen Formel für das Unterscheidungsgesetz keineswegs übersehen habe. Dieselbe gilt für unsere Lichtempfindungen nur, solange die Verhältnisse wesentlich dieselben bleiben, nämlich bis das Auge geblendet wird. Dafs ich die Untersuchungen nicht weiterführte, rührt erstens von dem praktischen Umstande her, dafs ich es nicht wagte, meinen Augen eine so anstrengende Arbeit zuzumuten. Ferner auch von der theoretischen Ansicht, dafs man unter neuen Verhältnissen neue Gesetze zu finden erwarten mufs oder allenfalls gesetzmäfsige Eingriffe in die vorher gültigen, so dafs es völlig berechtigt ist, jede einzelne Phase für sich zu studieren. Die Zunahme der Unterschiedsempfindlichkeit ist eine Phase für sich, die sich allein behandeln läfst, weil wir hier gar nichts mit den Verhältnissen zu schaffen haben, die deren Abnahme bei sehr starken Reizen bedingen.

In einer interessanten kleinen Abhandlung: »Über den Grund der Abweichungen von dem Weberschen Gesetz bei Lichtempfindungen«[1] hat Ebbinghaus die vorliegende Frage behandelt. Der Schlufsbemerkung der Abhandlung: »Die sogenannten Abweichungen von dem Weberschen Gesetz werden .... für eine photochemische Theorie von der Einwirkung des Lichts auf das Auge ein völlig begreifliches und selbst ganz gesetzmäfsiges Phänomen«, kann ich durchaus beistimmen. Im folgenden Abschnitte werde ich nachweisen, wie man das Unterscheidungsgesetz auf rationelle Weise aus bekannten photochemischen und physiologischen Gesetzen abzuleiten im stande ist. Insofern bin ich also mit Ebbinghaus ganz einig. Sonst bin ich mit ihm prinzipiell uneinig, namentlich was die Erklärung der

---

[1] Pflügers Archiv für Physiologie. Bd. 45.

oberen Abweichung vom Weberschen Gesetze betrifft. Ebbinghaus sucht darzulegen, dafs die intramolekularen Atombewegungen in der Netzhaut bei anwachsenden Lichtreizen ganz ebenso variierten, wie die Unterschiedsempfindlichkeit nach Königs und Brodhuns empirischen Ergebnissen variiert. Die Lichtempfindungen sollten also den photochemischen Vorgängen in der Netzhaut proportional werden; diese wären deshalb ausschliefslich als die Ursache der Variationen der Unterschiedsempfindlichkeit zu betrachten. Es scheint mir nun erstens ziemlich gewagt, ein Gesetz, das für Geschwindigkeiten der Moleküle in einer Gasart gilt, auf die organisierte Netzhaut zu übertragen. Selbst wenn man dieser Ansicht beitreten wollte, bleibt aber ja doch ein Punkt zurück, wo die Erklärung nicht stichhaltig ist. Solange die Stärke der Lichtreize keine gröfseren Forderungen an den Organismus stellt, als dieser zu erfüllen vermag, verwehrt uns nichts, uns zu denken, dafs im Zentralorgane psychophysische Prozesse ausgelöst würden, die den Atombewegungen in der Netzhaut proportional wären. Werden die Lichtreize aber so stark, dafs der Organismus unter denselben leidet, so kann dies nur eins von beiden bedeuten: entweder wollen die Atombewegungen in der Netzhaut nicht mehr dem Maxwellschen Gesetze gehorchen, oder auch vermag der Sehnerv die heftigen Reize nicht bis ins Gehirn zu befördern. Welchen Ausweg man auch wählen möchte, mufs das Resultat meiner Meinung nach das werden, dafs die Unterschiedsempfindlickeit nicht den durch das Maxwellsche Gesetz ausgedrückten Atombewegungen proportional variieren kann. Scheint eine derartige Proportionalität nichtsdestoweniger zu bestehen, so kommt dies wohl von einer zufälligen Ähnlichkeit der Maxwellschen Kurve mit der Kurve her, die den genauen Ausdruck für die Variationen der Unterschiedsempfindlichkeit gibt. Hierin liegt nichts Merkwürdiges. Zwei Kurven können sich sehr ähnlich sein, obwohl ihre Gleichungen äufserst verschieden sind. Es kann wohl keinen Zweifel erleiden, dafs Gleich. 28 für die von König gefundenen Werte der Unterschiedsempfindlichkeit gültig ist, und folglich mufs die der Gleich. 28 entsprechende Kurve fast ganz mit dem an-

steigenden Aste der Maxwellschen Kurve zusammenfallen, weil gerade Königs Messungen von Ebbinghaus benutzt wurden, um die Bedeutung der Maxwellschen Kurve für dieses Gebiet nachzuweisen. Der Umstand, dafs die Variationen der Unterschiedsempfindlichkeit anscheinend dem Maxwellschen Gesetze unterstehen, genügt also nicht, um darzuthun, dafs die physischen Verhältnisse, für die das Maxwellsche Gesetz gilt, auch die Ursache der Variationen der Unterschiedsempfindlichkeit sind. Es können sich thatsächlich ganz andere Ursachen geltend machen, die aber dennoch zu einem ähnlichen Resultate führen. In einem folgenden Abschnitte werden wir nachweisen, dafs das durch Gleich. 28 ausgedrückte Unterscheidungsgesetz sich wirklich als Resultat des Zusammenwirkens mehrerer bekannter physischer und physiologischer Prozesse erklären läfst.

Ebbinghaus' Fehler besteht also meines Erachtens darin, dafs er die Sache gar zu sehr von einem physischen Standpunkte betrachtet; die physiologischen Verhältnisse berücksichtigt er durchaus nicht. Dies macht sich namentlich fühlbar, wenn man die Erklärung auf andere Sinnesgebiete übertragen will. Hinsichtlich der Schallempfindungen z. B. zeigt die Unterschiedsempfindlichkeit ähnliche Variationen wie hinsichtlich der Lichtempfindungen; wie läfst sich hier aber die Ebbinghaussche Erklärung durchführen? Es kann hier doch wohl von photochemischen Prozessen keine Rede sein, die rein physischen Gesetzen gehorchen, mithin von aller organischen Struktur unabhängig sind. Die nämlichen Variationen der Unterschiedsempfindlichkeit müssen also mit Bezug auf das Gehör eine ganz andere Erklärung verlangen. Wie wir später sehen werden, besteht zwischen den zentralen Innervationen und der Muskelarbeit ein ganz ähnliches Abhängigkeitsverhältnis wie zwischen dem physischen Reize und der Empfindung. Hier scheint eine physische Erklärung ohne Berücksichtigung der physiologischen Verhältnisse noch weniger am Platze zu sein. Ebbinghaus' Erklärung ist also höchst einseitig; sie läfst sich nur auf einem einzigen Sinnesgebiete durchführen. Ich bin deshalb am meisten zu der Ansicht geneigt, dafs sie in der Realität gar keine Erklärung ist; sie ist nur der Nach-

weis der zufälligen, allerdings ganz merkwürdigen Übereinstimmung eines physischen Gesetzes mit einer sehr komplizierten psychophysiologischen Erscheinung.

Prüfung des Unterscheidungsgesetzes mittels der Methode der mittleren Abstufungen. Wir sahen oben, dafs einem ebenmerklichen Unterschied zwischen den Sektoren einer rotierenden Scheibe ein konstanter Wert der Periodenkonstante entspricht. Das heifst mit anderen Worten: die kritische Periode der Scheibe ist konstant, ist von den absoluten Helligkeiten der Sektoren unabhängig, wenn sie anfänglich einen ebenmerklichen Empfindungsunterschied hervorrufen. Die Annahme liegt deshalb nahe, dafs ein solcher konstanter Wert der Periode nicht nur für ebenmerkliche Empfindungsunterschiede, sondern auch für alle beliebigen gleichgrofsen Empfindungsdifferenzen zu finden ist. Es seien d, v und h drei verschiedene Helligkeiten, wo $d < v < h$; die hierdurch hervorgerufenen Empfindungen bezeichnen wir E_d, E_v und E_h. Ferner denken wir uns d, v und h so gewählt, dafs: $E_v - E_d = E_h - E_v$. Zwischen d und v ist also dieselbe Empfindungsdifferenz wie zwischen v und h. Entsprechen nun den gleichgrofsen Empfindungsunterschieden gleichgrofse Periodenkonstanten, so sollte man also der Gleich. 25 zufolge haben:

$$t = (k - k_1 \log. v)\left[1 + \frac{1}{\left(\frac{v}{d}-1\right)\left(1+\alpha+\frac{\beta}{\gamma+\log.\frac{v}{d}}\cdot\frac{d}{v}\right)}\right] =$$

$$(k - k_1 \log. h)\left[1 + \frac{1}{\left(\frac{h}{v}-1\right)\left(1+\alpha+\frac{\beta}{\gamma+\log.\frac{h}{v}}\cdot\frac{v}{h}\right)}\right]$$

. . . . (Gleich. 30).

Die Gültigkeit dieser Gleichung für Beobachter zu prüfen, deren Konstanten wir nicht vorher auf anderem Wege kennen, ist natürlich ein Ding der Unmöglichkeit. Es würde daher auch ziemlich hoffnungslos sein, die Frage nach der Anwendung der Methode der mittleren Abstufungen an diesem Punkte zu erheben, wenn wir Gleich. 30 nicht recht bedeutend vereinfachen könnten.

Hier haben wir aber einen der Fälle, wo wir statt Gleich. 25 die Gleich. 17 mit Erfolg anwenden können. Benutzen wir diesen einfacheren Ausdruck, so wird Gleich. 30:

$$t = k - k_1 \log. v + C \frac{d}{v} = k - k_1 \log. h + C \frac{v}{h},$$

woraus folgt:

$$\frac{d}{v} = \frac{v}{h} - \frac{k_1}{C} (\log. h - \log. v) \;\ldots\; \text{(Gleich. 31)}.$$

Setzt man hier $k_1/C = K_2$, so erhält man:

$$d = \frac{v^2}{h} - K_2 (\log. h - \log. v)\, v \;\ldots\; \text{(Gleich. 32)}.$$

Es ist natürlich nicht zu erwarten, daſs Gleich. 32 völlige Genauigkeit geben sollte, vor Gleich. 30 hat sie aber das voraus, daſs sie sich leicht prüfen läſst, so daſs sich entscheiden läſst, ob sie oder ob das Webersche Gesetz am besten mit den Versuchsresultaten übereinstimmt. Aus dem Weberschen Gesetze folgt nämlich:

$$\frac{d}{v} = \frac{v}{h}, \text{ also } d = \frac{v^2}{h}.$$

Als Grundlage der Prüfung benutzte ich Delboeufs Tab. III[1], die, wie früher nachgewiesen[2], als die zuverlässigste seiner Versuchsreihen zu betrachten ist. Da diese klassischen Versuche dem Weberschen Gesetze einst so groſse Stütze gewährten, lag es ja nahe, zu untersuchen, ob sie denn doch nicht besser mit dem hierformulierten Unterscheidungsgesetze übereinstimmen sollten. Eine Übersicht über die Berechnungen ist in der Tab. 14 gegeben.

(Siehe Tab. 14 S. 77.)

Die Kolonnen d, v und h geben die gemessenen Gröſsen der Reize an; als wahrscheinlicher Wert der Konstante K_2 wurde 0,0588 gefunden; die in der Kolonne »ber. d« angeführten Zahlen wurden also berechnet aus der Gleichung:

$$d = \frac{v^2}{h} - 0{,}0588\, (\log. h - \log. v)\, v.$$

---

[1] Étude psychophysique. Bruxelles 1878. S. 62.

[2] Phil. Stud. Bd. III. S. 515.

Tab. 14.

d	v	h	d ber.	f	$\frac{v^2}{h}$	$\frac{v^2}{h} - d$
9	47	243,4	7,1	+ 1,9	9,1	+ 0,1
13	27	55,2	12,7	+ 0,3	13,2	+ 0,2
13	36	94,8	12,8	+ 0,2	13,7	+ 0,7
13	41	123,4	12,5	+ 0,5	13,6	+ 0,6
13	56	235,8	11,2	+ 1,8	13,3	+ 0,3
21	60	157,0	21,5	— 0,5	22,9	+ 1,9
21	64	175,8	21,7	— 0,7	23,3	+ 2,3
22	36	56,8	22,4	— 0,4	22,8	+ 0,8
22	51	107,4	23,3	— 1,3	24,2	+ 2,2
22	58	139,2	22,9	— 0,9	24,2	+ 2,2
22	66	183,2	22,1	— 0,1	23,8	+ 1,8
43	64	94,0	43,0	0,0	43,6	+ 0,6
43	72	119,8	42,3	+ 0,7	43,3	+ 0,3
43	87	168,8	43,4	— 0,4	44,8	+ 1,8

Die Abweichungen der gefundenen von den berechneten Werten des d sind unter der Überschrift f gegeben. Wie man sieht, sind diese Fehler nicht grofs, und überdies fallen sie ziemlich gleichmäfsig nach positiver und negativer Richtung. Des Vergleiches wegen berechnete ich d auch aus dem Weberschen Gesetze: $d = v^2/h$ und ebenfalls die Abweichung der somit gefundenen Zahlen von den gemessenen d; diese Gruppen von Zahlen stehen in den beiden letzten Kolonnen. Die Fehler gehen, wie ersichtlich, in betreff des Weberschen Gesetzes ausschliefslich in positiver Richtung; zudem sind sie durchweg gröfser als die Fehler, die unter der Voraussetzung eintreffen, dafs Gleich. 32 gültig ist. Für letztere ist die totale Fehlersumme: $\Sigma \pm f = 9{,}46$, während sie für die nach dem Weberschen Gesetze berechneten Zahlen 15,76, also gegen doppelt so grofs ist. Es scheint daher keinem Zweifel zu unterliegen, dafs die in Gleich. 32 gegebene Formel des Unterscheidungsgesetzes mit Delboeufs Versuchen übereinstimmt.

Es war indes nun nicht Gleich. 32, sondern die sehr komplizierte Gleich. 30, deren Gültigkeit dargethan werden sollte. Der Unterschied zwischen diesen Gleichungen beruht aber darauf, dafs erstens in der Gleich. 32 der Kontrast nicht berücksichtigt wurde — was hier übrigens auch von untergeordneter Bedeutung ist —, und dafs ferner die Gröfse K_2 als Konstante betrachtet wurde, was sie thatsächlich nicht ist. Wir setzten nämlich ja

$k_1/C = K_2$, C ist aber eine Gröfse, die mit v bezw. h anwächst, was aus den Bemerkungen zu Gleich. 17 hervorgeht (siehe S. 43). Die Folge hiervon wird, dafs Gleich. 32 sich als um so ungenauer erweisen mufs, je mehr v und h voneinander abweichen. Eben dies geht aber aus Tab. 14 hervor. Man wird hier sehen, dafs die gröfsten Fehler (f) auf diejenigen Fälle kommen, wo v und h an Gröfse sehr verschieden sind. Folglich müfste es sich erweisen, dafs Gleich. 30, wenn wir im stande wären, sie zu prüfen, noch besser mit Delboeufs Messungen übereinstimmen würde.

Bevor wir jedoch konstatieren können, dafs die hier entwickelte Form des Unterscheidungsgesetzes wirklich gültig ist, müssen wir noch einen Punkt aufklären. Bekanntlich glaubte Merkel durch seine Untersuchungen der Lichtempfindungen nach der Methode der mittleren Abstufungen gefunden zu haben, dafs gleichgrofsen Empfindungsunterschieden — nicht gleichgrofse Quotienten, sondern — gleichgrofse Differenzen der Reize entsprächen[1]. Mit den hier angewandten Bezeichnungen sollte man also haben $v - d = h - v$, wenn $E_v - E_d = E_h - E_v$. Merkel findet dieses Gesetz freilich nicht genau übereinstimmend, meint aber, es passe jedenfalls besser als das Webersche. Um zu prüfen, wie es sich hiermit verhält, stellte ich auf Grundlage der ausführlichsten Versuchsreihe Merkels[2] Berechnungen an, die ganz denjenigen entsprachen, welche oben mit Bezug auf Delboeufs Versuche durchgeführt wurden. Die Resultate gebe ich in der Tab. 15, deren ersten drei Kolonnen die gemessenen Werte der Reize d, v und h enthalten. Berechnet man aus diesen Gröfsen den wahrscheinlichen Wert der Konstante K_2 in Gleich. 32, so erhält man $K_2 = 0{,}5741$, worauf d sich berechnen läfst aus der Gleichung:

$$d = \frac{v^2}{h} - 0{,}5741\,(\log. h - \log. v)\ v.$$

Die solchergestalt gefundenen Werte sind unter der Überschrift »d ber.« gegeben; unter f findet man die Abweichungen von den gemessenen d.

---

[1] Phil. Studien. Bd. IV. S. 569.

[2] Ibid. Tab. IX. S. 567.

Tab. 15.

d	v	h	d ber.	f	$\frac{v^2}{h}$	$\frac{v^2}{h} - d$	$2v - h$
0,5	8,3	32	— 0,64	+ 1,14	2,15	+ 1,65	— 15,4
0,5	5,45	16	0,39	+ 0,11	1,86	+ 1,36	— 5,1
0,5	2,98	8	0,38	+ 0,12	1,11	+ 0,61	— 2,04
0,5	1,86	4	0,51	— 0,01	0,86	+ 0,36	— 0,28
0,5	1,166	2	0,52	— 0,02	0,68	+ 0,18	+ 0,332
0,5	0,721	1	0,46	+ 0,04	0,52	+ 0,02	+ 0,442
24	472,3	1536	6,3	+ 17,7	145,2	+ 121,2	— 591,4
24	293,8	768	42,0	— 18,0	112,4	+ 88,4	— 180,4
24	157,7	384	29,8	— 5,8	64,8	+ 40,8	— 68,6
24	93,6	192	28,9	— 4,9	45,6	+ 21,6	— 4,8
24	58,21	96	28,0	— 4,0	35,3	+ 11,3	+ 20,42
24	39,79	48	31,1	— 7,1	33,0	+ 9,0	+ 31,58

Ferner sind die nach dem Weberschen Gesetze berechneten $d = v^2/h$ und die Abweichungen dieser Zahlen von den gemessenen Werten des d angegeben. Wir vergleichen nun vorerst das Unterscheidungsgesetz mit dem Weberschen Gesetze. Man sieht, dafs die unter f angeführten Fehler durchweg ziemlich klein und zwar teils positiv, teils negativ sind, während die Abweichungen vom Weberschen Gesetze $(v^2/h) - d$ ausschliefslich positiv und überall gröfser sind. Es erleidet also keinen Zweifel, dafs auch Merkels Versuche besser mit Gleich. 32 als mit dem Weberschen Gesetze übereinstimmen. Ferner erweist sich hier dasselbe wie durch Delboeufs Messungen: je gröfser der Unterschied zwischen v und h ist, um so gröfser sind auch die Abweichungen der berechneten von den gemessenen Werten des d. Dies deutet nun wieder darauf hin, dafs Gleich. 30 mit den Messungen besser übereinstimmen mufs als Gleich. 32. — Hierauf kehren wir uns gegen Merkels Ansicht, dafs die Gleichung $v - d = h - v$ der genaueste Ausdruck für das Verhältnis zwischen den drei Reizen sein sollte. Aus dieser Gleichung folgt: $d = 2\,v - h$; die auf diese Weise berechneten Zahlen sind in der letzten Kolonne der Tab. 15 angeführt. Wie man sieht, sind diese Zahlen durchaus unsinnig; durchweg zeigen sie kolossale Abweichungen von den gemessenen Werten des d und kommen diesen nur ausnahmsweise so nahe wie die nach dem Weberschen Gesetze berechneten Werte. Merkel hätte ganz sicher die Behauptung nicht auf-

stellen können, dafs sein Gesetz gültig sei, hätte er nur eine so einfache Berechnung ausgeführt. Statt dessen stellte er mittels einiger relativen Fehlerbestimmungen einen Vergleich seines Gesetzes mit dem Weberschen an; ich mufs aber gestehen, dafs ich durchaus nicht weifs, auf welche mathematischen Prinzipien er seine Berechtigung hierzu stützt. Ich vermag nicht anders zu sehen, als dafs die Gültigkeit eines Gesetzes sich nur dadurch beweisen läfst, dafs die aus dem Gesetze berechneten Zahlen mit den wirklich gefundenen übereinstimmen, und dasjenige Gesetz mufs als das richtigste angesehen werden, welches die gröfste Übereinstimmung der Berechnung mit der Messung gibt. Denn was mit einer mathematischen Formel bezweckt wird, ist ja gerade die Berechenbarkeit der Erscheinung, für die das Gesetz aufgestellt ist. Da die aus Merkels Formel berechneten Gröfsen überhaupt durchaus keine Annäherung an die gemessenen zeigen, läfst sich dieser Formel auch keine Bedeutung beilegen.

Als Resultat dieser Untersuchungen können wir jetzt also folgende Sätze aufstellen:

Gleichgrofsen Empfindungsunterschieden entsprechen weder gleichgrofse Differenzen noch gleichgrofse Quotienten der Reize.

Dagegen wird es sich erweisen, dafs die Reize mit einer für den praktischen Gebrauch genügenden Genauigkeit folgende Formel befriedigen:

$$\frac{d}{v} = \frac{v}{h} - K_2 (\log. h - \log. v).$$

Diese Gleichung wird jedoch um so weniger genau, je gröfser der Unterschied zwischen den beiden gröfsten Reizen, v und h, ist.

Letzterer Umstand deutet darauf hin, dafs nicht die angeführte Gleichung, sondern das in Gleich. 30 gegebene, komplizierte Abhängigkeitsverhältnis sich zwischen den drei Reizen geltend macht, wenn diese gleichgrofse Empfindungsunterschiede hervorrufen. Hieraus folgt dann wieder, dafs die hypothetische Voraussetzung, von der wir ausgingen, nämlich dafs gleichgrofsen Empfindungsunterschieden gleichgrofse Periodenkonstanten entsprächen, in der That richtig ist. Und da

wir oben fanden, dafs einem ebenmerklichen Empfindungsunterschiede eine von der absoluten Helligkeit der Sektoren unabhängige Periodenkonstante entspricht, so können wir diese Thatsachen in folgenden Satz zusammenfassen:

Jedem gegebenen Empfindungsunterschied von konstanter Gröfse, einerlei ob derselbe ebenmerklich oder übermerklich ist, entspricht stets ein von der absoluten Helligkeit der Sektoren unabhängiger Wert der Periodenkonstante.

Marbe hat offenbar eine Ahnung von diesem Verhältnisse gehabt, vermochte aber nicht, es mit seinen übrigen Resultaten in Übereinstimmung zu bringen. Er findet nämlich: »Die Werte der kritischen Periodendauern werden im wesentlichen durch die objektiven, nicht durch die subjektiven Unterschiede der beiden Reize bestimmt. Gleichen objektiven Unterschieden entsprechen ungefähr gleiche kritische Periodedauern[1].« Anderseits erweist es sich indes, dafs auch der subjektive Unterschied der Reize Einflufs auf die Zeit hat. Zwischen diesen Resultaten: dafs sowohl gleichen objektiven als gleichen subjektiven Unterschieden konstante Werte der kritischen Periode entsprechen, findet er einen Widerspruch, was ganz natürlich ist, da eines das andere ausschliefst. Wenn Marbe diesen Widerspruch nicht zu lösen vermag, liegt das einfach darin, dafs er seine Resultate nicht zum Gegenstand einer mathematischen Behandlung macht, sondern sich damit begnügt, dergleichen sonderbare Sätze aufzustellen, wie: »Gleichen objektiven Unterschieden entsprechen ungefähr u.s.w.« Hier liegt der Fehler. Das Verhältnis der kritischen Periode zu den Reizen ist, wie wir wissen, ein weit komplizierteres; der genaue Ausdruck wurde in Gleich. 25 gegeben. Dagegen ist es, wie wir ebenfalls sahen, eine Thatsache, dafs gleichgrofsen Empfindungsunterschieden stets gleichgrofse kritische Perioden entsprechen. Hier ist faktisch also keine Spur von Widerspruch; nur in Marbes unmathematischer Behandlung der Sache sieht es so aus.

[1] Phil. Stud. Bd. XIII. S. 114—115.

RATIONELLE ABLEITUNG DES UNTERSCHEIDUNGSGESETZES FÜR LICHTEMPFINDUNGEN.

Wenn Lichtstrahlen in eine nicht völlig durchstrahlbare Platte eindringen, wird ein Teil des Lichtes absorbiert werden. Wie sehr das Licht geschwächt wird, ist natürlich von der Natur des Stoffes und der Dicke der Platte abhängig, man hat indes gefunden, dafs in einer Schicht von bestimmter Dicke und bestimmtem Stoffe stets ein konstanter Bruchteil der eindringenden Lichtmenge zurückgehalten wird. Denjenigen Bruchteil des Lichtes, der in einer Schicht von der Dicke 1 zurückgehalten wird, nennt man den Absorptionskoeffizienten. Bezeichnen wir diesen durch ε und die Stärke des eindringenden Lichtes durch R, so wird in einer Schicht von der Dicke 1 folglich die Lichtmenge εR zurückgehalten, und aus dieser Schicht tritt mithin die Lichtmenge $R - \varepsilon R = R(1 - \varepsilon)$. Denkt man sich die Platte als aus mehreren Schichten, jede von der Dicke 1, bestehend, so wird also in die zweite Schicht die Lichtmenge $R(1-\varepsilon)$ eintreten, von welcher wieder der Bruchteil ε absorbiert wird. Folglich wird aus der zweiten Schicht die Lichtmenge:

$$R(1 - \varepsilon) - \varepsilon R(1 - \varepsilon) = R(1 - \varepsilon)^2$$

austreten. Hat die Platte die Dicke D, so wird aus der letzten Schicht also die Lichtmenge:

$$R_D = R(1 - \varepsilon)^D \quad . \; . \; . \; . \; \text{(Gleich. 33)}$$

austreten. Was aus der im Stoffe zurückgehaltenen Lichtmenge wird, beruht wesentlich auf der chemischen Beschaffenheit des Stoffes. Kann die Platte sich nicht unter dem Einflusse des Lichtes verändern, so wird die gesamte absorbierte Lichtmenge wahrscheinlich in Wärme umgesetzt. Enthält die Platte dagegen, wie es mit der lichtempfindlichen Schicht einer photographischen Platte der Fall ist, Stoffe, die sich unter der Einwirkung des Lichtes chemisch verändern, so wird wenigstens ein Teil der Lichtenergie dazu verbraucht werden, Umlagerungen der Atome zu erzeugen. Ob nun aber die

sämtliche einfallende Lichtmenge oder nur ein Teil derselben zu irgend einer Art Veränderungen verbraucht wird, so wird, wie Bunsen und Roscoe nachgewiesen haben[1], das Licht stets in dem durch das Absorptionsgesetz (Gleich. 33) ausgedrückten Verhältnisse geschwächt werden.

Wir untersuchen nun näher die Absorptionsverhältnisse einer lichtempfindlichen Platte, die wir uns in Analogie mit einer gewöhnlichen photographischen negativen Platte denken. Die Erfahrung lehrt, dafs für eine derartige lichtempfindliche Schicht ein gewisser Schwellenwert existiert, den die Lichtstärke übersteigen mufs, wenn während gegebener Zeit in der Schicht eine chemische Veränderung hervorgerufen werden soll. Eine photographische Platte kann kurze Zeit hindurch einem schwachen Lichte ausgesetzt werden, ohne dafs dies auf den lichtempfindlichen Stoff irgend einen nachweisbaren Einflufs erhielte. Die Dauer der Zeit und die Gröfse des Schwellenwertes sind natürlich von der Empfindlichkeit des Stoffes abhängig; für einen gegebenen lichtempfindlichen Stoff wird es also einen Wert, R_0, geben, den die Lichtstärke übersteigen mufs, damit während einer Zeiteinheit, z. B. einer Sekunde, eine nachweisbare chemische Veränderung hervorgerufen werden kann. Sinkt die Lichtstärke unter R_0, so wird man eine chemische Wirkung nur dadurch erzielen können, dafs man die Einwirkungsdauer des Lichtes (die Expositionszeit) angemessen verlängert. Zahlreiche Erfahrungen haben gezeigt, wie zur Erzielung einer chemischen Wirkung von bestimmter Gröfse erforderlich ist, dafs das Produkt der Lichtstärke und der Expositionszeit konstant ist[2]. Wenn also die Lichtstärke R_0 während der Zeit 1 eben keine Wirkung hervorzurufen vermag — oder, was ganz dasselbe ist, nur ein Differential von Wirkung hervorruft —, so wird dasselbe von der Lichtintensität R_D während der Expositionszeit T gelten[3], sofern nur:

$$R_D \cdot T = R_0 \cdot 1 \quad . \ . \ . \ . \ \text{(Gleich. 34)}.$$

---

[1] Poggend. Annal. Bd. CI.

[2] Nernst, Theoretische Chemie. 2. Aufl. Stuttgart 1898. S. 686

[3] T und t haben hier und im Folgenden nicht die früheren speziellen Bedeutungen.

In der Gleich. 33 haben wir einen Ausdruck für die Stärke desjenigen Lichtes, das aus der D—sten Schicht der lichtempfindlichen Platte austritt, wenn das eindringende Licht die Intensität R hat. Nehmen wir nun an, dafs diese austretende Lichtmenge R_D gerade so klein ist, dafs sie während der Zeit T keine Wirkung hervorzubringen vermag, so erhält man also, indem man aus Gleich. 34 den Ausdruck für R_D in Gleich. 33 einsetzt:

$$\frac{R_0}{T} = R\,(1 - \varepsilon)^D.$$

Die Lösung dieser Gleichung mit Bezug auf D ergibt:

$$D = \frac{1}{-\log.(1-\varepsilon)} \cdot \log.\frac{R \cdot T}{R_0};\ \text{setzt man}\ \frac{1}{-\log.(1-\varepsilon)} = c,$$

$$\text{wird: } D = c \cdot \log.\frac{RT}{R_0}\ \ldots\ldots\ (\text{Gleich. 35}).$$

In Gleich. 35 haben wir also einen Ausdruck für die Tiefe D, bis zu welcher die photochemische Wirkung während der Zeit T in eine photographische Platte eindringen wird, wenn das einfallende Licht die Intensität R hat. Hierbei wird vorausgesetzt, dafs die Dicke der empfindlichen Schicht gröfser als D oder wenigstens gleich D ist; findet dies nicht statt, so kann die Wirkung natürlich auch nicht regelmäfsig fortschreiten, und die Platte wird dann, wie die Photographen sagen, »durchgebrannt«. Dafs die Gleichung übrigens, wenn die genannte Bedingung erfüllt wird, einen richtigen Ausdruck für die Gröfse der Wirkung gibt, geht daraus hervor, dafs man aus Gleich. 35 Formeln ableiten kann, die mit den bekannten Mafsregeln praktischer Photographen unter verschiedenen Umständen völlig übereinstimmen.

Die Frage ist nun die: gilt Gleich. 35 auch für die Netzhaut? Ist dies der Fall, so braucht man offenbar nur anzunehmen, dafs die Empfindung E der Gröfse D proportional ist[1], wodurch die annähernde Gültigkeit des Weberschen Gesetzes erklärt wird. Man kann dann setzen:

$$E = c_1\ D = c_2 \log.\frac{RT}{R_0}\ \ldots\ldots\ (\text{Gleich. 36}),$$

[1] Über die Berechtigung dieser Annahme Näheres unten im Abschnitte: Die physiologische Bedeutung der Mafsformel.

welche Formel sich nur durch den Faktor T von Fechners Maſsformel unterscheidet. Der Umstand, daſs die Zeit in die Formel aufgenommen wird, gibt jedoch durchaus keinen gewichtigen Einwurf gegen die Gültigkeit der Gleich. 36 ab, sondern scheint im Gegenteil dieselbe zu bestätigen, denn es ist eine bekannte Sache, daſs Gesichtsempfindungen bis zu einem gewissen Grade wirklich mit der Zeit anwachsen. Namentlich aus Exners Untersuchungen[1] weiſs man, daſs die Empfindung ihre volle Stärke nicht sogleich, sondern erst nach Verlauf einer kurzen Zeit erreicht; für kleine Werte des T ist es also unzweifelhaft, daſs die Empfindung von der Zeit abhängig ist. Ferner ist es eine Thatsache, daſs die Empfindung, unter Voraussetzung hinlänglich kurzer Reizungen, durch das Produkt $R \cdot T$ bestimmt ist; auf dieser Voraussetzung beruht alle Photometrie mittels rotierender Scheiben. Hat man zwei Sektoren, den einen von der Gröſse G^0 und der Helligkeit R, den anderen von der Gröſse g^0 und der Helligkeit r, so werden diese, wenn sie mit genügender Geschwindigkeit vor einem lichtlosen Raum rotieren, dieselbe Lichtempfindung hervorrufen, sofern:

$$R \cdot G = rg \text{ oder } \frac{R}{r} = \frac{g}{G} \quad . \; . \; . \; . \text{ (Gleich. 37).}$$

Von der Richtigkeit der Gleich. 37 kann man sich überzeugen, indem man das Verhältnis R/r mittels andrer photometrischen Methoden bestimmt, wodurch man der Erfahrung gemäſs denselben Zahlenwert erhält, der durch den Bruch g/G angegeben ist[2]. Nun läſst sich aber das Verhältnis g/G leicht durch die Zeiten ausdrücken, während deren R und r aufs Auge wirken. Rotieren die beiden Sektoren nämlich um dieselbe Achse, also mit derselben Winkelgeschwindigkeit — was bei dergleichen Messungen gewöhnlich der Fall sein wird —, so ist es unmittelbar zu ersehen, daſs die Zeiten, während welcher sie auf die Netzhaut wirken, sich wie die Gradmaſse der Sektoren verhalten. Man hat also:

---

[1] Exner: Über die zu einer Gesichtswahrnehmung nötige Zeit. Sitzungsberichte d. Wiener Akademie. Bd. 58. 1868.

[2] Lehmann, Über Photometrie mittels rotierender Scheiben. Phil. Stud. Bd. IV. 1888.

$$\frac{R}{r} = \frac{g}{G} = \frac{t}{T}, \text{ folglich } R \cdot T = r \cdot t.$$

Eben dieses Resultat geht aber aus Gleich. 36 hervor. Soll der Reiz R während der Zeit T dieselbe Empfindung hervorrufen, wie der Reiz r während der Zeit t, so mufs Gleich. 36 zufolge:

$$E = c_2 \log. \frac{R\,T}{R_0} = c_2 \log. \frac{r \cdot t}{R_0},$$

was nur möglich ist, wenn $R \cdot T = r \cdot t$.

Die photometrischen Bestimmungen mittels rotierender Scheiben legen also die relative Gültigkeit der Gleich. 36 dar. Wie oben gesagt, kann die Gleich. 36 aber nur als für sehr kleine Werte des T gültig betrachtet werden. Wüchse nämlich die Empfindung mit der Dauer des Reizes ohne Begrenzung an, so würde hieraus folgen, dafs jede, sogar die geringste Gröfse des R eine Empfindung von jeder beliebigen Intensität hervorrufen könnte, wenn nur die Betrachtung des leuchtenden Objektes lange genug fortgesetzt würde. Es ist leicht zu sehen, dafs ein derartiges Verhältnis, wenn es stattfände, für unsere Auffassung der Aufsenwelt äufserst ungünstig sein würde. Ein Vergleich und eine Schätzung leuchtender Objekte von verschiedener Lichtstärke würde fast unmöglich sein, wenn unsere Empfindungen immer mehr an Intensität zunähmen, je länger wir die Objekte betrachteten. Diese Konsequenz wäre aber unvermeidlich, wenn Gleich. 36 unbedingte Gültigkeit besäfse, so dafs die photochemische Wirkung auf die Netzhaut ununterbrochen mit der Dauer anwüchse. Für die gewöhnliche photographische Platte gilt dies, indem man thatsächlich durch passende Vergröfserung des T jeden beliebigen gewünschten Wert des D, selbst bei sehr kleinen Gröfsen des R erzielen kann. Es ist z. B. bekannt, dafs man bei der photographischen Aufnahme des Sternenhimmels eine um so gröfsere Anzahl leuchtender Punkte auf der Platte erhält, je länger man die Expositionszeit macht. Dies gilt aber ja gerade nicht von der Netzhaut. Selbst wenn man irgend einen Punkt am Himmel stundenlang anstarrt, sieht man keinen einzigen Stern mehr, als gleich anfangs. Sogar diejenigen Sterne, welche eben an der Grenze der Sichtbarkeit liegen, sind

nicht im stande, bei längerer »Expositionszeit« gröfsere Wirkung auf die Netzhaut zu üben, so dafs sie sichtbar würden. Die Wirkung dieser gerade unsichtbaren Sterne auf die Netzhaut mufs im ersten Momente offenbar eine äufserst geringe sein, und sie wird auch, wenn die Expositionszeit unbegrenzt zunimmt, nicht merklich gröfser. Es geht also hieraus hervor, dafs die photochemische Wirkung auf die Netzhaut nach Verlauf einer gewissen, sehr kurzen Zeit T_m ihr Maximum D_m erreicht hat, und eine fernere Verlängerung der »Expositionszeit« wird daher keine Zunahme der Intensität der Empfindung zur Folge haben. Setzen wir diese Gröfsen in Gleich. 36 ein, so erhalten wir also folgenden Ausdruck für die maximale Empfindung, die von einem gegebenen Reize R hervorgebracht werden kann:

$$E = c_1 D_m = c_2 \log. \frac{R \cdot T_m}{R_0} \quad \ldots . \text{(Gleich. 38).}$$

Streng genommen wäre es wohl am richtigsten, dem dem D_m entsprechenden Maximalwerte der Empfindung eine besondere Bezeichnung E_m zu geben. Dafs ich dies nicht that, liegt einfach darin, dafs wir eigentlich stets, sowohl in der Wissenschaft als im täglichen Leben, mit diesem Maximalwerte der Empfindung operieren. T_m ist nämlich so klein, nur wenige Zehntel einer Sekunde, dafs ganz spezielle Mafsregeln zu treffen sind, wenn man die Empfindung, bevor sie ihre volle Stärke erreicht hat, zu untersuchen wünscht. Die Rede ist denn auch immer von der maximalen Empfindung, wenn man sagt, dem Reize R entspreche eine bestimmte Empfindung E. Und da wir uns im Folgenden auf die Abhängigkeit der Empfindung von der Zeit nicht näher einlassen werden, können wir unbedenklich durch E die dem D_m entsprechende Empfindung bezeichnen.

Bei Gleich. 38 können wir nun nicht stehen bleiben, da T_m keine konstante Gröfse ist. Exner wies nach, dafs T_m selbst eine Funktion des R ist, und ferner wies er folgendes Abhängigkeitsverhältnis zwischen T_m und R nach: »Wenn die Reizungs-Intensitäten in geometrischer Progression wachsen, so nehmen die Zeiten, die zwischen Beginn der Reizung und ihrer höchsten Intensität verlaufen, in arithmetischer Progression

ab[1].« Den mathematischen Ausdruck für ein solches Abhängigkeitsverhältnis fanden wir bereits oben (S. 37): in Analogie mit Gleich. 12 können wir setzen:

$$T_m = a - a_1 \log. R \quad .\ .\ .\ .\ \text{(Gleich. 39)},$$

wo a und a_1 zwei Konstanten sind, bei deren Bedeutung wir hier nicht zu verweilen brauchen, da sie dem über die Konstanten k und k_1 in Gleich. 12 Entwickelten analog ist. Wird nun der Ausdruck für T_m in Gleich. 38 eingesetzt, so erhält man:

$$E = c_1 D_m = c_2 \log. \left[\frac{R}{R_0}(a - a_1 \log. R)\right] \quad .\ .\ .\ .\ \text{(Gleich. 40)}.$$

In Gleich. 40 haben wir also einen Ausdruck für die maximale Empfindungsstärke, die der Reiz R zu erzeugen vermag, allein als Funktion von R und gewissen Konstanten gegeben. Bevor wir aus dieser Formel weitere Schlüsse ziehen, wird es seine Bedeutung haben, eine Kontrolle für die Richtigkeit des Ausdrucks zu suchen. Eine solche Prüfung läfst sich mittels einer anderen Reihe von Messungen anstellen, die Exner in der oben citierten Abhandlung mitgeteilt hat. Um zu bestimmen, wie eine Lichtempfindung mit der Zeit wächst, verfuhr Exner nämlich so, dafs er einen Reiz R kurze Zeit hindurch aufs Auge einwirken liefs und mafs, wie lange derselbe wirken mufste, damit die ausgelöste Empfindung gleich derjenigen würde, welche durch einen schwächeren Reiz hervorgebracht wurde, der konstant wirkte und folglich das Maximum[2] der Empfindung auslöste. Die Intensität des schwächeren Reizes war bei den verschiedenen Bestimmungen ein gewisser Bruchteil, 1/10, 2/10, 3/10 u. s. w. des stärkeren, und für jede dieser Intensitäten fand er die Zeit, während welcher der stärkere Reiz wirken mufste, um dieselbe Empfindung wie der schwächere, konstant wirkende,

[1] An cit. Orte S. 601.

[2] Dies ist, streng genommen, nicht richtig, denn wir wissen, dafs ein fortdauernd wirkender Lichtreiz nur kurze Zeit hindurch das Maximum der Empfindung hervorruft; darauf nimmt die Empfindung wieder langsam ab. Die Verminderung ist jedoch so gering, dafs wir, um die Sache nicht gar zu kompliziert zu machen, hiervon absehen können, die abgeleitete Formel wird deswegen aber auch nicht völlig genau.

zu geben. Aus den obenstehenden Formeln können wir leicht die Bedingung für die Identität zweier solchergestalt hervorgerufener Empfindungen ableiten. Der stärkere Reiz mag R sein und während der Zeit T gewirkt haben. Zufolge Gleich. 36 hat er dann die Empfindung:

$$E = c_2 \log. \frac{R \cdot T}{R_0}$$

hervorgerufen. Ist nun der schwächere Reiz $1/n$ von R, und hat er so lange gewirkt, dafs er das Maximum der Empfindung hervorgerufen hat, so ist nach Gleich. 40:

$$E = c_2 \log. \left[\frac{R}{nR_0}\left(a - a_1 \log. \frac{R}{n}\right)\right]$$

Nun sollen diese beiden Empfindungen sich gleich sein, also:

$$E = c_2 \log. \frac{RT}{R_0} = c_2 \log. \left[\frac{R}{nR_0}\left(a - a_1 \log. \frac{R}{n}\right)\right], \text{ woraus}$$

$$T = \frac{a - a_1 \log. R + a_1 \log. n}{n}$$

Da R während der Messungen konstant bleibt, wird folglich auch $a - a_1 \log. R$ konstant; wir können daher $a - a_1 \log. R = A_1$ setzen und erhalten dann als gesuchten Ausdruck der Zeit:

$$T = \frac{A_1 + a_1 \log. n}{n}$$

In der Tab. 16 sind die Resultate von Exners Messungen gegeben. Unter $1/n$ ist angeführt, welchen Bruchteil des stärkeren Reizes der schwächere betrug; n ist der aus dem Dezimalbruche berechnete Nenner, und unter T sind die gemessenen Zeitdauern in Tausendsteln Sekunden angeführt. Aus den zusammengehörenden Werten n und T lassen sich mittels der Methode der kleinsten Quadrate die Konstanten A_1 und a_1 im Ausdrucke für T bestimmen, wodurch man $A_1 = 138$ und $a_1 = -61$ findet. Man hat also:

$$T = \frac{138 - 61 \log. n}{n}$$

Werden hierin nach und nach die verschiedenen Werte des n eingesetzt, so läfst sich das entsprechende T berechnen; die auf diese Weise gefundenen Gröfsen sind

in Tab. 16 unter »T ber.« gegeben, und unter f hat man die Abweichung der gemessenen Gröfsen hiervon. Die Übereinstimmung der Messung mit der Berechnung ist

Tab. 16.

$\frac{1}{n}$	n	T	T ber.	f
0,1	10,0	8	8	0
0,2	5,0	23	19	+ 4
0,3	3,33	37	32	+ 5
0,4	2,5	40	46	— 6
0,5	2,0	49	60	— 11
0,6	1,67	58	73	— 15
0,7	1,43	81	89	— 8
0,8	1,25	104	101	+ 3
0,9	1,11	127	121	+ 6
1,0	1,00	166	138	+ 28

so grofs, wie es sich bei Messungen so schwieriger Art erwarten läfst. Um die Übersicht zu erleichtern, habe ich die Resultate Pl. VIII, A, graphisch wiedergegeben, wo die Zeit als Abscisse, $^1/n$ als Ordinate abgesetzt ist. Die gebrochene Linie verbindet die durch die Messung gefundenen Punkte, die Kurve gibt die berechneten Punkte an. Da den gemessenen Gröfsen, wie Fig. zeigt, ziemlich bedeutende Fehler anhaften, läfst sich keine gröfsere Übereinstimmung erwarten, besonders da unsere Formeln, wie oben berührt, nicht völlig genau sind. Die Gleichungen 36 und 40 dürfen also als richtig betrachtet werden, da die hieraus abgeleiteten Ausdrücke für Exners Messungen sich als mit diesen übereinstimmend erweisen[1].

[1] Eine höchst interessante Konsequenz, auf die wir uns hier jedoch nicht näher einlassen können, läfst sich aus Gleich. 40 ableiten. Hat man zwei Farben, z. B. Rot und Violett, deren objektiven Intensitäten R_r und R_v so gewählt sind, dafs die beiden Farben gleich hell erscheinen, so ist also $E_r = E_v$, indem E nur die Stärke der Empfindung bezeichnet. Die Bedingung hierfür ist aber die, dafs:

$$c_2 \log. \left[\frac{R_r}{R_0}(a - a_1 \log. R_r)\right] = c_2 \log. \left[\frac{R_v}{R_0}(a - a_1 \log. R_v)\right]$$

Nun ist es höchst unwahrscheinlich, dafs die Konstanten a und a_1 für die verschiedenen Farbenstrahlen dieselben sein sollten. Werden daher R_r und R_v mit derselben Zahl multipliziert, so wird man nicht mehr $E_r = E_v$ haben, da jede dieser Gröfsen auf ihre Weise mit dem

Der in Gleich. 40 gegebene Ausdruck für die Abhängigkeit der Empfindung von der Intensität der Reizung wird also, was G. E. Müller »die korrigierte Mafsformel« nennt, und da wir nun eine gewisse Garantie für seine Richtigkeit erhalten, läfst sich aller Wahrscheinlichkeit nach das »Unterscheidungsgesetz« auf ähnliche Weise daraus ableiten, wie Fechner seine »Fundamentalformel« aus der »Mafsformel« ableitet. Es ist hierbei allerdings verschiedenes zu berücksichtigen, wenn wir nicht nur eine mathematische Deduktion verlangen, sondern auch eine Formel wünschen, die alle zusammenwirkenden, auf das schliefsliche Resultat des Reizes, d. h. auf die Empfindung, influierenden Prozesse in Betracht zieht. Um aber diese Prozesse berücksichtigen zu können, müssen wir vor allen Dingen ihre Natur kennen, müssen wir wissen, welcher Art sie sind, und es ist dann ganz natürlich, vorerst die Ursache des bereits nachgewiesenen Unterschieds zwischen der Netzhaut und einer gewöhnlichen photographischen Platte aufzusuchen.

Die Frage ist also die: was ist die Ursache, weshalb die Empfindung nicht andauernd, sondern nur innerhalb eines kürzeren Zeitraums, T_m, mit der Zeit zugleich wächst? Soll sich eine rein physische Erklärung dieses Umstands geben lassen, so kann sie nur darin gesucht werden, dafs die photochemische Wirkung auf die Netzhaut schon nach Verlauf der Zeit T_m so grofs geworden ist, dafs sie überhaupt nicht mehr anwachsen kann. Da Gleich. 35, wie oben erwähnt, nur unter der Voraussetzung gültig ist, dafs D die Dicke der lichtempfindenden Schicht nicht übersteigt, so liegt die Annahme nahe, dafs diese Bedingung nach Verlauf der Zeit T_m nicht

---

entsprechenden R wächst. Die Folge wird also, dafs die beiden Farben, die bei einer gegebenen Intensität gleich hell erschienen, dies nicht mehr thun werden, wenn die Intensität für jede derselben in gleichem Verhältnisse zunimmt oder abnimmt. Wir haben hier mit anderen Worten Formeln für das Purkinjesche Phänomen erhalten. Quantitative Bestimmungen, die gegenwärtig unternommen werden, scheinen die Richtigkeit dieser Formeln völlig zu bestätigen; da es uns hier aber zu weit führen würde, wenn wir uns auf diesen speziellen Punkt näher einliefsen, ziehe ich es vor, diese Untersuchungen anderswo zu erörtern.

mehr erfüllt wird. Wegen der äufserst geringen Dicke der Netzhaut würde die Ansicht nicht so ganz unwahrscheinlich sein, dafs dieselbe in einem Bruchteil einer Sekunde »durchgebrannt« würde, und da D folglich nicht ferner wachsen könne, auch das dem D proportionale E nicht zu wachsen im stande sei. Näher betrachtet ist diese Erklärung jedoch durchaus unhaltbar. Die Betrachtung der Gleich. 38 genügt, um dies zu zeigen. Dieselbe gibt einen Ausdruck für die maximale Wirkung D_m, die ein gegebener Reiz R überhaupt auf die Netzhaut zu üben vermag. Nehmen wir nun an, dafs R anfänglich sehr klein ist. Nach Verlauf der Zeit T_m hat D_m dann eine gewisse Gröfse erhalten, die nun nicht mehr anwächst. Dies kann aber unmöglich davon herrühren, dafs D_m eine Gröfse gleich der Dicke der lichtempfindlichen Schichten der Netzhaut erreicht hat. Denn wenn R nun zu wachsen anfängt, so wächst faktisch E, folglich mufs auch D_m zugenommen haben, was unmöglich sein würde, wenn D_m schon vorher so grofs wäre, dafs es nicht mehr zunehmen könnte. Auf rein physischem Wege scheint die Thatsache, dafs für den Einflufs der Zeit auf das Wachstum der Empfindung schnell eine Grenze eintritt, sich also nicht erklären zu lassen.

Dieses eigentümliche Verhalten mufs daher zweifelsohne eine physiologische Ursache haben; es mufs ein vitaler Prozefs stattfinden, der schon nach Verlauf kurzer Zeit die Einwirkung des Lichtes auf die Netzhaut am ferneren Wachsen verhindert. Was dies für eine physiologische Thätigkeit ist, läfst sich natürlich nicht apriorisch entscheiden. Wir werden aber später erfahren, dafs dieselbe, den nämlichen Gesetzen unterworfene Thätigkeit sich auch bei der Muskelarbeit geltend macht. Und im letzteren Falle läfst es sich mit gröfster Wahrscheinlichkeit nachweisen, dafs es der Stoffwechsel im arbeitenden Organe ist, der diese eigentümliche Wirkung herbeiführt. Es ist deshalb höchst wahrscheinlich, dafs es auch der Stoffwechsel in der Netzhaut ist, der der Tiefe, bis zu welcher die photochemische Wirkung einzudringen vermag, so schnell die Grenze setzt. Diese Ansicht ist an und für sich auch ganz natürlich. Da das Licht nämlich geschwächt wird,

indem es in die lichtempfindliche Schicht eindringt, wird die photochemische Wirkung um so schwächer, je tiefer das Licht eindringt, und sie mufs also in irgend einer Tiefe so gering werden, dafs der Stoffwechsel im stande ist, ihr das Gleichgewicht zu halten, da statt des verbrauchten Stoffes stets neuer zugeführt wird. Ist dieser Zustand des Gleichgewichts eingetreten, so kann die Wirkung nicht tiefer dringen, und mithin wird auch die Empfindung ihr Maximum erreicht haben, indem wir voraussetzen, dafs die Empfindung der Tiefe der photochemischen Wirkung proportional ist. — Hierzu kommt noch ein anderer Umstand. Wenn ein Organ arbeitet, mufs der Stoffwechsel an dieser Stelle notwendigerweise lebhafter werden, als wenn das Organ sich in Ruhe befindet. Deshalb gewahrt man auch überall, wo eine Kontrolle überhaupt möglich ist, dafs der Blutzuflufs stärker wird, sobald das Organ in Thätigkeit kommt. Und je lebhafter diese Thätigkeit ist, um so stärker wird auch innerhalb gewisser Grenzen der Blutzuflufs und somit der Stoffwechsel. Es erweist sich aber gerade, dafs dies bei dem vitalen Prozesse der Fall ist, der dem Eindringen der photochemischen Wirkung in die Netzhaut eine Schranke aufstellt. Aus dem oben angeführten Exnerschen Gesetze (vgl. Gleich. 39) geht hervor, dafs die maximale Wirkung um so schneller erreicht wird, je gröfser die Stärke des Reizes ist. Da nun die Menge des in der Netzhaut dekomponierten Stoffes notwendigerweise mit der Reizung anwachsen mufs, so läfst sich vermuten, dafs auch der Blutzuflufs um so stärker und der Stoffwechsel um so lebhafter sein werden, je gröfser die Reizung ist, und die Folge hiervon mufs dann die werden, die eben durch das Exnersche Gesetz ausgedrückt ist, nämlich dafs das Eindringen der Wirkung schneller seine Grenze erhält.

Alle hier angeführten Umstände: dafs der in der Netzhaut thätige vitale Prozefs sich auch auf ganz anderen Gebieten äufsert, dafs er überall dasselbe Gesetz befolgt, dafs dieses Gesetz uns eine mit der Arbeit des Organs anwachsende Thätigkeit zeigt, und endlich, dafs es sich auf einem bestimmten Gebiete darlegen läfst, wie dieser unbekannte vitale Prozefs der Stoffwechsel ist — dies alles scheint es unzweifelhaft

zu machen, dafs sich hier wirklich der Stoffwechsel des Organs geltend macht. Für mehrere der angeführten Behauptungen bin ich allerdings noch den Beweis schuldig, dieser wird aber nach und nach im Folgenden gegeben werden, und mir erscheint es deswegen als unbestreitbar, dafs es der Einflufs des Stoffwechsels auf die photochemische Wirkung in der Netzhaut ist, welcher durch den in Gleich. 40 aufgenommenen Faktor $(a - a_1 \log. R)$ mit in Anschlag gebracht ist. Es könnte möglicherweise als ziemlich unwesentlich aussehen, ob wir zu entscheiden vermögen, was das für eine Thätigkeit ist, die sich hier geltend macht, wenn das Gesetz dieser Thätigkeit nur bekannt ist. Es wird sich aber sogleich im Folgenden erweisen, dafs die weitere Entwickelung der Sache in hohem Grade erleichtert wird, wenn wir eine gewisse Sicherheit besitzen, dafs wir mit dem Stoffwechsel in der Netzhaut zu schaffen haben.

An der »korrigierten Mafsformel«, Gleich. 40, haben wir einen Ausdruck für E durch R. Wir suchen nun einen Ausdruck für den Zuwachs, den der Reiz erhalten mufs, um die Empfindung ebenmerklich gröfser zu machen. Man pflegt diesen Ausdruck durch Differentialrechnung aus der Mafsformel abzuleiten; obschon aber Fechner und nach ihm fast alle hervorragenden Psychophysiker diese Methode anwandten, halte ich sie dennoch für prinzipiell unrichtig. Ein ebenmerklicher Empfindungsunterschied ist kein Differential und noch weniger ist dies mit der Gröfse dR der Fall, die in die andere Seite der Gleichung aufgenommen wird. Dieser Zuwachs des Reizes, der mathematisch als ein Differential behandelt wird, ist in der Realität eine endliche Gröfse, die überdies oft einen beträchtlichen Wert hat. Man wird deshalb einen nicht unwesentlichen Fehler begehen, wenn man ihn als eine unendlich kleine Gröfse behandelt. Der Umstand, dafs man dies bisher gethan hat, ohne gröfsere Übelstände zu merken, beweist nichts. Denn das Webersche Gesetz ist, wie wir jetzt wissen, nur ein unvollständiger und durchaus ungenügender Ausdruck der thatsächlichen Verhältnisse; ein kleiner Fehler mehr oder weniger in diesem Ausdruck hat daher nicht viel zu sagen. Bei der genauen Behandlung der Erscheinungen, die wir hier bezwecken, würde eine

unzulässige mathematische Operation sich dagegen sofort rächen. Und da zudem die mathematischen Operationen nicht schwieriger werden, weil wir die Zuwächse der Empfindungen und der Reize als endliche Differenzen behandeln, so ist letzteres unbedingt vorzuziehen.

Dem Reize R entspricht die Empfindung E, gegeben durch die Formel:

$$E = c_2 \log. \left[\frac{R}{R_0} (a - a_1 \log. R) \right] \quad .\ .\ .\ .\ \text{(Gleich. 40)}.$$

Dem Reize r entspricht die Empfindung e, gegeben durch den analogen Ausdruck:

$$e = c_2 \log. \left[\frac{r}{R_0} (a - a_1 \log. r) \right]$$

Subtrahieren wir letztere Gleichung von ersterer, indem wir $E > e$ voraussetzen, so erhalten wir:

$$E - e = c_2 \log. \left[\frac{R}{R_0} (a - a_1 \log. R) \right] - c_2 \log. \left[\frac{r}{R_0} (a - a_1 \log. r) \right]$$
$$= c_2 \log. \frac{R\,(a - a_1 \log. R)}{r\,(a - a_1 \log. r)}$$

Nehmen wir nun an, dafs die Differenz $E - e$ ebenmerklich ist, und bezeichnen wir diesen ebenmerklichen Unterschied durch μ, so haben wir:

$$E - e = \mu = c_2 \log. \frac{R\,(a - a_1 \log. R)}{r\,(a - a_1 \log. r)}, \quad \text{woraus folgt:}$$

$$\frac{R}{r} \cdot \frac{a - a_1 \log. R}{a - a_1 \log. r} = 10^{\mu : c} = K_3 \quad .\ .\ .\ .\ \text{(Gleich. 41)}.$$

In der Gleich. 41 haben wir also die Bedingung, die von den Reizen R und r erfüllt werden mufs, sofern diese eine ebenmerkliche Empfindungsdifferenz hervorrufen sollen. Selbst wenn wir nun aber auch annehmen, dafs unser Ausgangspunkt, Gleich. 40, richtig ist, und selbst wenn die mathematische Deduktion sich unangreifbar erweist, ist es doch mehr als zweifelhaft, ob Gleich. 41 den thatsächlichen Verhältnissen entspricht. Oder besser: wir wissen, dafs dies nicht der Fall sein wird. Denn wenn die Netzhaut das Objekt zweier verschiedener gleichzeitiger Reizungen ist, so findet eine Kontrastwirkung zwischen diesen statt, und diese Kontrastwirkung, für die wir in Gleich. 21 einen Ausdruck

haben, mufs bei der Berechnung notwendigerweise berücksichtigt werden, wenn unsere Formel den thatsächlichen Verhältnissen entsprechen soll. Um dies zu erzielen, bringen wir erst Gleich. 41 in die Form:

$$\frac{R}{r} = K_3 \frac{a - a_1 \log. r}{a - a_1 \log. R}$$

Hieraus folgt ganz einfach:

$$\frac{R - r}{r} = K_3 \frac{a - a_1 \log. r}{a - a_1 \log. R} - 1$$

Dem oben (S. 52) Entwickelten zufolge wissen wir, dafs für $R - r$ zu setzen ist $J - i$, wenn der gegenseitige Kontrast in Anschlag gebracht werden soll. Wird nun zugleich der Ausdruck für $J - i$ aus Gleich. 21 eingesetzt, so hat man:

$$\left(\frac{R}{r} - 1\right)\left[1 + \alpha + \frac{\beta}{\gamma + \log. \frac{R}{r}} \cdot \frac{r}{R}\right] = K_3 \frac{a - a_1 \log. r}{a - a_1 \log. R} - 1 \quad \text{. . (Gleich. 42).}$$

Hiermit sind wir doch noch nicht fertig. Wir sahen oben, wie es gewisse Wahrscheinlichkeit hat, dafs der in Gleich. 40 und 41 aufgenommene Faktor $(a - a_1 \log. R)$ den Einflufs des Stoffwechsels auf die photochemische Wirkung in der Netzhaut ausdrückt, und dieser Einflufs ist, wie der Ausdruck selbst zeigt, eine Funktion des R. Verhält dies sich aber richtig, so ist es höchst unwahrscheinlich, dafs zwei gleichzeitige Reize, R und r, ganz voneinander unabhängig, auf den Stoffwechsel sollten influieren können. Jeder der Reize greift unleugbar seine Stelle der Netzhaut an, und der Stoffverbrauch an diesen Stellen ist wesentlich durch die Stärke der Reize bedingt, daraus folgt aber keineswegs, dafs dies auch von der Lebhaftigkeit des Stoffwechsels gilt. Wird der Blutzuflufs nach einem Organ wegen der Arbeit des Organs vermehrt, so wird der Stoffwechsel wahrscheinlich an allen Stellen lebhafter vorgehen, so dafs der am kräftigsten arbeitende Teil des Organs die gesamte Thätigkeit bestimmt. Ob im Gehirn eine stark vermehrte Blutzufuhr nach einem einzelnen Zentrum vorkommen kann, ohne dafs andere Stellen derselben teilhaft würden, mufs dahingestellt bleiben, in den peripheren Organen ist eine solche lokale Begrenzung aber sehr wenig wahrscheinlich. Wir wissen z. B., dafs

Muskelarbeit eines Armes vermehrte Blutzufuhr nicht nur nach dem arbeitenden Arme, sondern auch, wenngleich nicht in völlig so grofsem Umfange, nach dem anderen Arme bewirkt. Eine derartige Erscheinung deutet jedenfalls auf keine stark lokalisierte Vermehrung der Blutzufuhr hin, und es hat deshalb auch nur geringe Wahrscheinlichkeit für sich, dafs die Lebhaftigkeit, mit welcher der Stoffwechsel auf einem kleinen Areal der Netzhaut vorgeht, von den Vorgängen in den angrenzenden Arealen durchaus unabhängig sein sollte. Die natürlichste Annahme wird hier die, dafs der stärkere der beiden gleichzeitigen Reize die Blutzufuhr und die Lebhaftigkeit des Stoffwechsels bestimmt, dafs letzterer sonst aber an den verschiedenen Stellen je nach Bedarf verschieden wird.

Die Konsequenz dieser Betrachtungen, wenn sie auf unseren speziellen Fall angewandt werden, ist die, dafs Gleich. 42 eine Korrektion erleiden mufs. Der in der rechten Seite der Gleichung vorkommende Faktor:

$$\frac{a - a_1 \log. r}{a - a_1 \log. R}$$

gibt einen Ausdruck für den Einflufs des Stoffwechsels auf die photochemische Wirkung an den einzelnen Stellen der Netzhaut unter der Voraussetzung, dafs die einzelnen Stellen in dieser Beziehung ganz voneinander unabhängig sind. Dies darf man aber, den obigen Betrachtungen zufolge, kaum annehmen. Es mufs der stärkere Reiz, R, sein, der im ganzen den Einflufs des Stoffwechsels bestimmt, während letzterer nur an den durch r gereizten Stellen einen anderen Wert als an den durch R gereizten erhält. Wir kommen deshalb den thatsächlichen Verhältnissen gewifs am nächsten, wenn wir statt des Zählers:

$$a - a_1 \log. r \text{ den Ausdruck: } a_2 - a_3 \log. R$$

setzen, wo a_2 und a_3 zwei neue Konstanten sind. Setzt man diese Gröfse in Gleich. 42 ein, und führt man die Berechnungen aus, so erhält man:

$$\left(\frac{R}{r} - 1\right) \left[1 + \alpha + \frac{\beta}{\gamma + \log. \frac{R}{r}} \cdot \frac{r}{R} \right] = \frac{K_3\, a_2 - a - (K_3\, a_3 - a_1) \log. R}{a - a_1 \log. R}$$

Setzt man hier der Vereinfachung wegen:

$$K_3 a_2 - a = a_4 \text{ und } K_3 a_3 - a_1 = a_5,$$

so wird die Gleich. 42:

$$\left(\frac{R}{r} - 1\right)\left[1 + \alpha + \frac{\beta}{\gamma + \log.\frac{R}{r}} \cdot \frac{r}{R}\right] = \frac{a_4 - a_5 \log. R}{a - a_1 \log. R} \quad \ldots\ldots \text{(Gleich. 43)},$$

was also die Bedingung sein wird, welche die beiden Reize R und r erfüllen müssen, wenn sie einen ebenmerklichen Empfindungsunterschied hervorrufen sollen. Oder mit anderen Worten: es sollte sich erweisen, dafs Gleich. 43 nur eine andere Formulierung des in Gleich. 28 gegebenen »Unterscheidungsgesetzes« für Lichtempfindungen wäre. Dafs dies wirklich der Fall ist, läfst sich nun auch ohne Schwierigkeit nachweisen. Aus Gleich. 28 folgt nämlich erst:

$$\frac{1}{\left(\frac{R}{r} - 1\right)\left[1 + \alpha + \frac{\beta}{\gamma + \log.\frac{R}{r}} \cdot \frac{r}{R}\right]} = \frac{K_1}{k - k_1 \log. R} - 1$$

also:

$$\left(\frac{R}{r} - 1\right)\left[1 + \alpha + \frac{\beta}{\gamma + \log.\frac{R}{r}} \cdot \frac{r}{R}\right] = \frac{k - k_1 \log. R}{K_1 - k + k_1 \log. R}$$

Setzt man hier: $K_1 - k = k_2$, so erhält man:

$$\left(\frac{R}{r} - 1\right)\left[1 + \alpha + \frac{\beta}{\gamma + \log.\frac{R}{r}} \cdot \frac{r}{R}\right] = \frac{k - k_1 \log. R}{k_2 + k_1 \log. R}$$

welche Gleichung sich von Gleich. 43 offenbar nur durch die in der rechten Seite der Gleichung vorkommenden Konstanten unterscheidet. Dafs diese in den beiden Gleichungen nicht dasselbe Vorzeichen haben, kann wohl kaum ins Gewicht fallen, da wir überhaupt nichts darüber wissen, ob die Konstanten positiv oder negativ sind; das Wesentlichste ist, dafs die beiden Brüche für bestimmte numerische Werte der Konstanten gleichgrofs sein können. — Wir sind nun im stande, die ganze vorhergehende Entwickelung in Kürze folgendermafsen zu resümieren:

Wir haben, in Übereinstimmung mit einem bekannten physischen Gesetze, diejenige Tiefe gefunden, bis zu welcher die photochemische Wirkung in die Netzhaut eindringen mufs, wenn letztere durch Licht von gegebener Intensität gereizt wird. Wir haben

ferner sowohl den Stoffwechsel als den Einfluſs des gegenseitigen Kontrastes auf die photochemische Wirkung, wenn die Netzhaut an verschiedenen Stellen zugleich durch Licht von verschiedener Intensität gereizt wird, berücksichtigt[1]. Und indem wir voraussetzten, daſs die resultierenden Lichtempfindungen den photochemischen Wirkungen proportional sind, gelangten wir zu einem mit dem empirisch gefundenen Unterscheidungsgesetze identischen Ausdruck. Folglich scheint diese Voraussetzung richtig zu sein, und das »Unterscheidungsgesetz«, das korrigierte Webersche Gesetz, hat somit eine rein physisch-physiologische Erklärung erhalten.

Obschon diese ganze Entwickelung recht wahrscheinlich aussieht, muſs doch an einem einzelnen Punkte gewiſs eine wesentliche Korrektion unternommen werden. Dies verrät sich sogleich, wenn wir nun zur Untersuchung schreiten, ob das Unterscheidungsgesetz sich nicht möglicherweise auch auf anderen Gebieten als dem des Gesichtssinnes gültig erweisen sollte.

DIE GEMEINGÜLTIGKEIT DES UNTERSCHEIDUNGSGESETZES.

Die Gültigkeit des Unterscheidungsgesetzes für Schallempfindungen. Die oben citierten Worte von Ebbinghaus: daſs die sogenannten Abweichungen von dem Weberschen Gesetze sich einer photochemischen Theorie als völlig verständlich und gesetzmäſsig erweisen würden, haben sich durch unsere vorhergehenden Betrachtungen wirklich bestätigt. Gegen diese — oder jede beliebige andere — photochemische Theorie scheint mir aber der Einwurf naheliegend zu sein, daſs die Theorie der Natur der Sache zufolge nur für den Lichtsinn gültig sein kann. Aber auch auf anderen Sinnesgebieten, wo genaue Messungen möglich sind, vor allen

[1] Über den Einfluſs der Pupillenweite, siehe Anhang.

Dingen also rücksichtlich des Gehörs, hat es sich erwiesen, dafs die Unterschiedsempfindlichkeit keineswegs konstant ist, sondern auf ganz ähnliche Weise wie in betreff der Gesichtsempfindungen variiert. Es ist daher a priori auch ziemlich wahrscheinlich, dafs man für die Schallempfindungen ein Unterscheidungsgesetz nachweisen kann, analog demjenigen, das sich oben als für die Gesichtsempfindungen gültig erwies. Ganz genau dieselbe Form wird das Unterscheidungsgesetz wohl schwerlich auf den beiden Gebieten erhalten, da unsere Lichtempfindungen gleichzeitig eintreten und deshalb simultanem Kontrast und ähnlichen, bei Schallempfindungen unbekannten Erscheinungen unterworfen sind. Die gleichartigen Variationen der Unterschiedsempfindlichkeit auf den beiden Gebieten bieten indes Grund zu der Annahme, dafs die Unterscheidungsgesetze dennoch bis zu einem gewissen Grade miteinander übereinstimmen werden. Wie dies sich theoretisch erklären läfst, ist schwer zu verstehen, denn wenn man auf zwei Sinnesgebieten wesentlich übereinstimmende Verhältnisse zwischen Empfindung und Reiz findet, so mufs man zu der Annahme berechtigt sein, dafs die gleichartigen Gesetze von gleichartigen Funktionen herrühren. Es kann von einer photochemischen Thätigkeit im Ohre aber doch wohl nicht recht die Rede sein. Es scheint also, dafs wir das Unterscheidungsgesetz von gar zu speziellen Ausgangspunkten aus entwickelt haben, und es handelt sich deshalb darum, seine Gültigkeit auf verschiedenen Gebieten zu prüfen, um das zu einer Korrektion erforderliche Material zu beschaffen. Zuerst untersuchen wir nun seine Gültigkeit für Schallempfindungen.

Von Merkels Hand liegen eine Reihe Messungen der Unterschiedsempfindlichkeit für Schallempfindungen vor, nach der Methode der ebenmerklichen Unterschiede ausgeführt[1]. Zur Grundlage unserer Untersuchungen benutze ich die umfangreichste dieser Versuchsreihen[2], die in der Tab. 17 wiedergegeben ist. Unter den Überschriften R und r sind hier die zusammengehörenden

[1] Die Abhängigkeit zwischen Reiz und Empfindung. III. Schallreize. Phil. Stud. Bd. V.

[2] Ibid. S. 514.

Werte der beiden Reize und darauf ihr Verhältnis R/r gegeben. Die ersten vier Werte des R/r zeigen allmähliche Abnahme, die zehn letzten dagegen unregelmäfsige Schwankungen, die jedoch nicht gröfser sind, als dafs sie von Unsicherheit der Beurteilung herrühren können. R/r scheint hier also konstant zu sein; das Mittel der letzten zehn Werte ist 1,300, und die Abweichung der einzelnen Werte von diesem Mittel ist in der folgenden Kolonne unter der Überschrift f gegeben. Man sieht hier, dafs die Fehler sich ganz unregelmäfsig in positiver und negativer Richtung verteilen; der mittlere Fehler beträgt 0,0063. Das Webersche Gesetz scheint hier also innerhalb eines gröfseren Reizumfanges zu gelten, zugleich findet sich aber deutlich eine »untere« Abweichung, indem R/r wächst, wenn r sehr klein wird. Dasselbe kommt übrigens auch in einer anderen der Merkelschen Versuchsreihen zum Vorschein. Über die Ursache dieser Abweichungen sagt Merkel: »Die Tabellen zeigen, dafs auch bei den Schallempfindungen eine untere Abweichung vom Weberschen Gesetze vorhanden ist. Dieselbe wird sich je nach der Stärke des Tagesgeräusches bis zu gröfseren beziehentlich kleineren Werten von r erstrecken. Da ich meine Versuche in einem nach dem Garten zu gelegenen, von dem Lärm des Tages nach Möglichkeit abgeschlossenen Raume ausführte, so macht sich die untere Abweichung erst bei einem verhältnismäfsig schwachen Reize geltend[1].«

Die Richtigkeit dieser Erklärung hat Merkel gar nicht darzuthun versucht; dieselbe ist weiter nichts als ein Postulat. Und ein Beweis scheint doch um so dringender notwendig zu sein, da es längst festgestellt ist, dafs die unteren Abweichungen vom Weberschen Gesetze, was die Lichtempfindungen betrifft, sich nicht durch eine konstante Gröfse (das Eigenlicht des Auges) erklären lassen, die sich zu den gemessenen Reizen hinzuaddierte[2]. Es hätte doch nahe gelegen und wäre wohl nicht mit unüberwindlichen Schwierigkeiten verbunden gewesen, eine wenn auch nur kürzere Reihe

---

[1] Ibid. S. 515.

[2] Müller, Zur Grundlegung der Psychophysik. Berlin 1879. S. 181.

von Versuchen in der Stille der Nacht anzustellen, da es sich dann ja erweisen müfste, ob die Abweichungen, wenn sie auch nicht ganz wegfielen, doch nicht allenfalls auf ein Minimum reduziert würden. Auch auf dem Wege der Berechnung hätte sich ein Beweis führen lassen. Wirkt nämlich das Tagesgeräusch als annähernd konstanter Schall, der sich den gemessenen Reizen hinzuaddiert, so mufs diese unbekannte Gröfse, x, aus den Versuchen zu finden sein, indem man setzt:

$$\frac{R+x}{r+x} = b \quad \ldots \text{(Gleich. 44)}.$$

Hieraus folgt: $$x = \frac{R - br}{b - 1}$$

Setzt man hier $b = 1{,}300$, dem gefundenen Werte der Unterschiedsempfindlichkeit, von dem anzunehmen ist, dafs er auch für die kleinen Werte von R und r gilt, wenn zu diesen die konstante störende Ursache x addiert wird, und setzt man darauf nach und nach die zusammengehörenden Gröfsen R und r in die Gleichung ein, so erhält man für x die in der Tab. 17 angeführten Werte. Diese weichen augenscheinlich so wenig voneinander ab, dafs x wirklich als eine konstante Gröfse zu betrachten ist, deren mittlerer Wert 0,52 wird. Wir können nun in Gleich. 44 $x = 0{,}52$ setzen und darauf b durch successives Einsetzen der zusammengehörenden Werte

Tab. 17.

R	r	$\frac{R}{r}$	f	x	b	f_1
0,681	0,412	1,654		0,48	1,289	— 0,010
1,521	1,030	1,477		0,61	1,317	+ 0,018
2,784	2,025	1,375		0,50	1,298	— 0,001
5,415	4,050	1,337		0,51	1,299	0,000
13,18	10,12	1,302	+ 0,002		1,287	— 0,012
32,27	24,96	1,293	— 0,007		1,287	— 0,012
63,72	49,43	1,289	— 0,011		1,286	— 0,013
172,4	132,4	1,302	+ 0,002		1,301	+ 0,002
336,6	259,7	1,296	— 0,004		1,296	— 0,003
640,6	488,6	1,311	+ 0,011		1,311	+ 0,012
1128	869,4	1,297	— 0,003		1,297	— 0,002
2075	1590	1,305	+ 0,005		1,305	+ 0,006
3196	2468	1,294	— 0,006		1,294	— 0,005
6476	4936	1,312	+ 0,012		1,312	+ 0,013
	Mittel	1,300	± 0,0063	0,52	1,299	± 0,0078

von R und r berechnen. Wir gelangen hierdurch zu den in der Tabelle unter der Überschrift b angegebenen Gröfsen. Vergleicht man diese Zahlen mit den in der Kolonne R/r befindlichen, so sieht man, dafs die beiden Reihen erst von $R = 336{,}6$ an völlig miteinander zusammenfallen, was also heifsen will, dafs der Einflufs des konstanten Geräusches sich bei allen schwächeren Reizen spüren läfst. Übrigens zeigt es sich, dafs die Gröfsen b annähernd konstant sind; das Mittel beträgt 1.299 und weicht also nur ganz unwesentlich von $R/r = 1{,}300$ ab. Unter der Überschrift f_1 ist angegeben $f_1 = b - 1{,}299$; man sieht, dafs diese Fehler durchweg klein sind und unregelmäfsig in positiver und negativer Richtung schwanken; ihr Mittel ist 0.0078. Das Resultat hiervon wird also, dafs Gleich. 44 wirklich für die Merkelschen Messungen der Unterschiedsempfindlichkeit für Schallempfindungen gültig zu sein scheint, was mit anderen Worten heifst, dafs das Webersche Gesetz, hinsichtlich des konstanten Geräusches korrigiert, für diese Versuche gilt.

Bei näherer Erwägung wird man es auch ganz natürlich finden, dafs das Unterscheidungsgesetz für Schallempfindungen eine Form wie Gleich. 44 annimmt, die mit der entsprechenden für Lichtempfindungen (Gleich. 43 oder der damit identischen Gleich. 28) verglichen sich durch ihre Einfachheit auszeichnet. Denn dafs Gleich. 43 so kompliziert wird, kommt, wie wir sahen, daher, dafs beim Gesichtssinne sowohl der Einflufs des Stoffwechsels auf die peripheren Prozesse als der simultane Kontrast zu berücksichtigen ist. Beide diese Faktoren sind aber wahrscheinlich ohne alle Bedeutung für das Gehör. Von simultanem Kontraste kann der Natur der Sache zufolge bei Schallempfindungen, die notwendigerweise successiv entstehen müssen, um scharf auseinander gehalten werden zu können, gar nicht die Rede sein. Dagegen gibt es gewifs einen, wenngleich nur geringen successiven Kontrast, und der Einflufs desselben ist aus den die Unterschiedsempfindlichkeit angebenden Zahlen nicht eliminiert. Successiver Kontrast zwischen Schallempfindungen mufs sich nämlich auf die Weise äufsern, dafs ein stärkerer, auf einen schwächeren Schall folgender

Schall stärker scheint, als er eigentlich sein sollte, und umgekehrt. Läfst man daher bei der Bestimmung der Unterschiedsempfindlichkeit r den ersten Reiz sein, so mufs der folgende Reiz R, weil er nach dem schwächeren kommt, als zu stark erscheinen, weshalb R also einen Wert erhält, der ein wenig kleiner ist, als er sein würde, wenn kein Kontrast stattfände. Stellt man nun aber eine andere Reihe von Versuchen an, bei welchen R der erste, r der zweite Reiz ist, so wird r kleiner scheinen, als es thatsächlich ist, weil es auf den stärkeren Reiz R folgt, und hiervon mufs dann wieder die Folge werden, dafs R einen zu kleinen Wert erhält. Das Mittel der beiden Werte von R wird dann ein wenig kleiner, als der Fall sein würde, wenn kein Kontrast stattfände. Der successive Kontrast zwischen Schallempfindungen ist der Erfahrung gemäfs indes so gering, dafs seine Gröfse sogar unter günstigen Verhältnissen sich kaum messen läfst, und bei zwei einander so nahe liegenden Reizen wie R und r kann er ganz aufser acht gelassen werden. Deswegen wird im Unterscheidungsgesetze für Schallempfindungen keine Korrektion hinsichtlich des successiven Kontrastes unternommen. (Über den durch die Succession verursachten Zeitfehler, der mit dem Kontraste nichts zu thun hat, siehe S. 112.)

Was ferner den Stoffwechsel betrifft, so ist es leichtverständlich, dafs dieser für den Gesichtssinn eine sehr wesentliche Rolle spielen mufs, während er für das Gehör fast ohne Bedeutung ist. Ist eine Stelle der Netzhaut nur wenige Sekunden der Reizung durch ein einigermafsen starkes Licht ausgesetzt gewesen, so läfst sich erfahrungsgemäfs in der Empfänglichkeit der betreffenden Stelle für nachfolgende Reize eine Veränderung nachweisen. Eine solche Veränderung deutet aber auf einen Umsatz, einen Verbrauch von Stoff hin, und hiermit geht es nun wieder zusammen, dafs eine mehr oder weniger lebhafte Ernährung des arbeitenden Organs grofsen Einflufs auf die resultierenden Empfindungen erhält. Ganz anders mit dem Ohr. Selbst wenn man 15—20 Minuten hindurch fortwährend einen und denselben Ton anhört, wird es kaum möglich sein, eine Veränderung der Empfänglichkeit nachzuweisen. Der Stoffverbrauch des arbeitenden

Organs mufs hier also ein so geringer sein, dafs er immer durch den Stoffwechsel völlig ausgeglichen wird. Hieraus folgt nun wieder, dafs ein Einflufs des Stoffwechsels auf Schallempfindungen sich nicht nachweisen läfst, weshalb auch keine Korrektion des Unterscheidungsgesetzes in dieser Beziehung erforderlich ist. Von der ganzen, komplizierten Gleich. 43 bleibt daher weiter nichts übrig als R/r = konst., wozu jedoch die in Gleich. 44 angegebene Korrektion hinsichtlich des unvermeidlichen äufseren Lärms hinzuzufügen ist. Eine ähnliche Korrektion ist in betreff der Lichtempfindungen dagegen nicht erforderlich, da man mittels hinlänglicher Adaptation das »Eigenlicht des Auges« bis auf ein unmerkliches Minimum herabsetzen kann.

Wir verstehen also vollkommen, weshalb das für Lichtempfindungen äufserst komplizierte Unterscheidungsgesetz sich für Schallempfindungen auf einen sehr einfachen Ausdruck reduzieren läfst. Dagegen ist es durchaus unverständlich, weshalb ein konstanter Unterschied zwischen Schallempfindungen R/r = konst. verlangt. Was die Lichtempfindungen betrifft, war dieses Verhältnis die einfache Folge davon, dafs die photochemische Wirkung auf die Netzhaut von der Stärke des Reizes logarithmisch abhängig ist (Gleich. 38). Es scheint also zwischen den Reizungen und den Veränderungen im akustischen Apparate ein ähnliches Verhältnis zu bestehen, aber warum? Welcher Art sind diese Veränderungen? Zur Beantwortung dieser Frage gebricht es uns einstweilen offenbar an jeglichem Ausgangspunkte. Wir werden später aber dieselbe Gesetzmäfsigkeit auf einem dritten Gebiete wiederfinden, wo die speziellen Verhältnisse neues Licht auf das Problem werfen, und wo wir den Versuch anstellen werden, dasselbe zu lösen.

Die gleiche Gröfse ebenmerklicher Unterschiede. Bevor wir die Untersuchungen über Schallempfindungen abschliefsen, erübrigt es noch, den Beweis für die Richtigkeit der Voraussetzung zu führen, von welcher wir bei allen unseren vorhergehenden Untersuchungen ausgingen, dafs nämlich ebenmerkliche Unterschiede zwischen Empfindungen derselben Art gleichgrofse Empfindungsunterschiede sind. Diese Voraus-

setzung wurde in der Einleitung festgestellt als ein Postulat, auf dessen Beweis wir uns damals nicht einlassen konnten. Wir nehmen die Frage gerade hier zur endlichen Entscheidung vor, weil die zu einer Beantwortung erforderlichen Versuche bisher nur auf dem Gebiete des Gehörs vorliegen. Diese Versuche stellte Ament[1] in Würzburg unter Beistand der bekannten Psychologen Külpe und Marbe an, deren Namen verbürgen, dafs die Messungen mit all der Sorgfalt und Gewissenhaftigkeit, welche die Wichtigkeit der Frage erheischt, durchgeführt wurden.

Ament geht von folgender Betrachtung aus. Ist das Webersche Gesetz auf irgend einem Sinnesgebiete innerhalb eines bestimmten Reizumfangs gültig, so hat man hier innerhalb dieser Grenzen $E = c \log. R$. Wählt man nun innerhalb des Gebietes, auf dem das Gesetz gültig ist, drei Reize, R, M und r, so, dafs sich mit Bezug auf die entsprechenden Empfindungen zwischen E_R und E_M derselbe Unterschied zeigt wie zwischen E_M und E_r, so mufs man haben:

$$E_R - E_M = c(\log. R - \log. M) = E_M - E_r = c(\log. M - \log. r)$$

und folglich: $\frac{R}{M} = \frac{M}{r}$, oder $M^2 = R \cdot r$ . . . . (Gleich. 45).

Lehrt die Erfahrung nun, dafs Gleich. 45 nicht gilt, obschon sie eine mathematisch notwendige Konsequenz des Weberschen Gesetzes ist, so läfst dies sich nur dadurch erklären, dafs die ebenmerklichen Unterschiede nicht gleichgrofs sind. Sind nämlich die ebenmerklichen Unterschiede gleichgrofs, so ist E als eine Gröfse zu betrachten, die sich in jedem einzelnen Falle als mit dem ebenmerklichen Unterschiede zur Mafseinheit gemessen denken läfst (vgl. S. 11), und dann mufs Gleich. 45 sich notwendigerweise auch als gültig erweisen. Zeigt es sich daher, dafs dies nicht mit der Wirklichkeit übereinstimmt, so mufs die Voraussetzung: der ebenmerkliche Unterschied als gedachte Mafseinheit, falsch sein, oder mit anderen Worten: der ebenmerkliche Unterschied kann nicht überall dieselbe Gröfse haben.

Auf zwei verschiedenen Wegen, einem direkten und

[1] Über das Verhältnis der ebenmerklichen zu den übermerklichen Unterschieden bei Licht- und Schallintensitäten. Phil. Stud. Bd. XVI.

einem indirekten, untersucht Ament nun, ob Gleich. 45 wirklich gültig ist. Beide Wege führen zu demselben Ergebnisse, da aber nur der sogenannte indirekte Weg Zahlengröfsen gibt, die sich mathematisch behandeln lassen, müssen wir uns darauf beschränken, diese Messungen zu betrachten. Sie sind nur für Schallempfindungen durchgeführt, wir werden später aber nachweisen, dafs dieselben Konsequenzen, die sich auf natürliche Weise aus Aments Schallversuchen ableiten lassen, auch für die Lichtempfindungen gültig sind. Wir beginnen also mit Aments Messungen auf dem Gebiete des Gehörs. Hier wird vorerst die Unterschiedsempfindlichkeit zweier Beobachter, K und A, für eine Reihe von Reizen innerhalb der Grenzen 1 und 46,95 bestimmt. In den Tab. 18a und 18b sind unter der Überschrift r die benutzten Reize angegeben, unter $\triangle r$ die dem ebenmerklichen Unterschiede entsprechenden Zuwächse der Reize. Um nun die Berechnungen auf dieselbe Weise wie überall im Vorhergehenden durchführen zu können, habe ich in einer dritten Kolonne $R = r + \triangle r$ und darauf das Mafs für die Unterschiedsempfindlichkeit R/r angeführt. Man sieht, dafs letztere Werte für Reize zwischen 11,24 und 32,78 fast konstant sind; hier hat also das Webersche Gesetz Gültigkeit. Es gibt übrigens eine untere Abweichung, ganz in Übereinstimmung mit dem, was man bei anderen Messungen dieser Art gefunden hat, indem die Werte hier zu grofs sind. Aufserdem findet sich hier aber eine ganz sonderbare obere Abweichung, indem der dem gröfsten Wert des r entsprechende Wert von R/r bedeutend kleiner ist als die zunächst vorhergehenden. Ament macht selbst auf dieses Faktum aufmerksam, ohne irgend eine Erklärung zu versuchen, was doch wohl notwendig sein möchte, da eine solche plötzliche Verminderung des R/r sonst ganz unbekannt ist. Da sie in beiden Versuchsreihen vorkommt, mufs sie notwendigerweise von einem vom Beobachter unabhängigen, konstanten Fehler herrühren, wahrscheinlich von einem Fehler des »Schallpendels«, durch welches die Reize hervorgebracht wurden. Da hierüber aber keine Aufschlüsse vorliegen, müssen wir die Messungen nehmen, wie sie sind.

Tab. 18a.

Unterschiedsschwelle für K.

r	$\triangle r$	R	$\frac{R}{r}$	b	f
46,95	5,85	52,80	1,125	1,120	— 0,030
32,78	5,31	38,09	1,162	1,154	+ 0,004
20,76	3,41	24,17	1,164	1,152	+ 0,002
11,24	1,92	13,16	1,170	1,149	— 0,001
4,50	1,06	5,56	1,236	1,172	+ 0,022
1,00	0,40	1,40	1,400	1,150	0,000
				1,150	

Tab. 18b.

Unterschiedsschwelle für A.

r	$\triangle r$	R	$\frac{R}{r}$	b	f
46,95	10,5	57,45	1,224	1,217	— 0,050
32,78	9,88	42,66	1,301	1,288	+ 0,021
20,76	6,56	27,32	1,316	1,295	+ 0,028
11,24	3,18	14,42	1,283	1,250	— 0,017
4,50	1,99	6,49	1,442	1,333	+ 0,066
1,00	0,55	1,55	1,550	1,222	— 0,045
				1,267	

Der nächste Schritt bezweckte nun, die Gröſse des Reizes M zu bestimmen, der das Mittel zweier willkürlich gewählter Reize R und r zu sein schien. Diese Bestimmungen wurden ebenfalls von beiden vorigen Beobachtern K und A ausgeführt. Wir betrachten vorerst die von K gewonnenen, in Tab. 19 wiedergegebenen Resultate. Unter den Überschriften R und r sind hier die willkürlich gewählten Grenzen, unter M die durch

Tab. 19.

Unterschiedsvergleichung für K.

R	r	M	R_g	$R + 1{,}67$	$r + 1{,}67$	M_1
46,95	1	14,78	6,85	48,62	2,67	9,7
32,78	1	9,34	5,73	34,45	2,67	7,9
20,76	1	6,75	4,56	22,43	2,67	6,0
11,24	1	4,14	3,35	12,91	2,67	4,2
46,95	11,24	24,00	22,97	48,62	12,91	23,2
46,95	4,50	20,91	14,53	48,62	6,17	15,6
32,78	4,50	14,19	12,15	34,45	6,17	12,9

die Versuche gefundene Mitte angegeben. Die Gröfse sollte, wenn Gleich. 45 gültig ist, das geometrische Mittel von R und r sein; man sollte also haben: $M = R_g = \sqrt{R \cdot r}$. In der Kolonne R_g sind die berechneten Werte $R_g = \sqrt{R \cdot r}$ angeführt. Die Gröfsen weichen, wie man sieht, von den empirisch gefundenen M so stark ab, dafs keine Rede davon sein kann, M als $= R_g$ zu betrachten. Dasselbe gilt (vgl. Tab. 20) in noch höherem Grade von den vom Beobachter A gefundenen Zahlen. Hieraus zieht Ament nun den, dem Anschein nach, berechtigten Schlufs, dafs ebenmerkliche Unterschiede also nicht gleichgrofs sein können.

Gegen diese Konklusion läfst sich doch mancherlei einwenden. Erstens kann man nur erwarten, dafs Gleich. 45 innerhalb des Reizumfangs gültig ist, wo das Webersche Gesetz gilt. Dies hebt Ament selbst hervor; obgleich er das Webersche Gesetz aber nur für Reize zwischen den Grenzen 11,24 und 32,78 gültig findet, wendet er dennoch bei allen Versuchen nach der Methode der mittleren Abstufungen sowohl höhere als niedrigere Werte von R und r an. Ich gestehe, dafs es mir ganz unbegreiflich ist, was dies bezweckt. Nur wo das Webersche Gesetz gültig ist, kann davon die Rede sein, Gleich. 45 gültig zu finden. Nichtsdestoweniger verlangt Ament, sie solle auch für Reize gelten, hinsichtlich deren die notwendige Voraussetzung nicht erfüllt ist. Das ist mindestens keine gute Logik. Wenn Ament einen so naheliegenden und wesentlichen Fehler in seiner Behandlung der Zahlen übersehen hat, kann es kein Erstaunen erregen, dafs er auch andere, weniger auffallende Irrtümer begangen hat. Ich verlasse nun Herrn Ament und seine Räsonnements und schreite zur Untersuchung, welche Resultate sich mit Recht aus den vorliegenden Versuchen herleiten lassen.

Erstens sahen wir im Vorhergehenden bei der Betrachtung der Merkelschen Versuche, dafs man für Schallempfindungen nicht $R/r =$ konst. hat; dagegen gilt:

$$\frac{R + x}{r + x} = b \quad . \; . \; . \; . \; \text{(Gleich. 44)}.$$

Wenden wir diese Gleichung nun sowohl auf Tab. 18a als auf Tab. 18b an, so sind wir im stande, auf dieselbe

Weise wie oben (S. 102) einen annähernden Wert von x für jede der beiden Tabellen zu bestimmen[1]. Wir erhalten dann für Tab. 18a: $x = 1{,}67$ und für Tab. 18b: $x = 1{,}48$. Jede der beiden Versuchsreihen ergibt also fast denselben Wert von x, was sie ja auch gerne sollten, da das Tagesgeräusch eine vom Beobachter unabhängige Gröfse sein mufs. Werden diese Zahlen in Gleich. 44 eingesetzt, so haben wir:

$$\text{für Tab. 18a: } b = \frac{R + 1{,}67}{r + 1{,}67}$$

$$\text{und für Tab. 18b: } b = \frac{R + 1{,}48}{r + 1{,}48}$$

Durch successives Einsetzen der zusammengehörenden Werte von R und r in diese Formeln läfst sich b berechnen, und die erhaltenen Zahlen sind in den Tabellen 18a und b unter der Überschrift b gegeben. Für jeden einzelnen Beobachter sind die Werte annähernd konstant; für Tab. 18a ist das Mittel 1,150, für Tab. 18b 1,267. Die Abweichungen der einzelnen Gröfsen von diesen Mitteln sind unter der Überschrift f gegeben. Wie man sieht, sind die Fehler ziemlich grofs, besonders wenn man sie mit den entsprechenden der Merkelschen Versuche (Tab. 16) vergleicht; das kann uns aber nicht in Erstaunen setzen, da hier wahrscheinlich, wie oben bemerkt, konstante Fehler der Instrumente Einflufs übten. Übrigens zeigen sie keine gesetzmäfsigen Variationen, und man darf deshalb Gleich. 44 als auch für diese Versuche gültig betrachten.

Wir sehen also, dafs das Webersche Gesetz auch hier nicht in seiner reinen Gestalt gültig ist, was von Ament vorausgesetzt wurde, und dafs zu den ge-

---

[1] Streng genommen hätten x und b mittels der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt werden sollen, wodurch man zugleich die wahrscheinlichsten Werte dieser beiden Unbekannten finden würde. Überwältigende Schwierigkeit würde dies allerdings nicht verursachen, wohl aber eine Masse unnötiger Berechnungen erfordern, die ich mir hier und in mehreren ähnlichen Fällen ersparen zu können glaubte. Die genaue Bestimmung von Konstanten, die nur für ein einzelnes Individuum unter gegebenen Bedingungen gelten, hat nur geringes Interesse; uns kommt es nur darauf an, die Gültigkeit der Gleichungen zu prüfen, und das kann ebensogut geschehen, ohne den grofsen Apparat der Fehlerausgleichung in Anwendung zu bringen.

messenen Reizen ein konstanter Addend hinzuzufügen ist. Hieraus folgt, dafs man nicht erwarten kann, Gleich. 45 für gleichgrofse Empfindungsunterschiede gültig zu finden, und dafs man dagegen haben mufs:

$$\frac{R + x}{M_1 + x} = \frac{M_1 + x}{r + x}, \text{ oder } M_1 = \sqrt{(R + x)(r + x)} - x \,. \text{ (Gl. 46).}$$

Für die von *K* ausgeführten Messungen fanden wir $x = 1{,}67$; für die von diesem Beobachter ausgeführten Bestimmungen nach der Methode der mittleren Abstufungen müssen wir folglich haben:

$$M_1 = \sqrt{(R + 1{,}67)(r + 1{,}67)} - 1{,}67.$$

Werden hier successiv die der Tab. 19 entnommenen zusammengehörenden Werte von R und r eingesetzt, so läfst sich das entsprechende M_1 berechnen; die auf diese Weise berechneten Gröfsen sind in Tab. 19 unter der Überschrift M_1 gegeben. Man sieht, dafs M_1 dem experimentell bestimmten M bedeutend näher kommt, als mit R_g der Fall ist; jedoch wird die Abweichung des M_1 von M um so gröfser, je gröfser R ist, was anzeigt, dafs auch Gleich. 46 für diese Versuche nicht streng gültig ist. Noch ungünstiger wird das Verhältnis, wenn wir die entsprechenden, von *A* ausgeführten Messungen betrachten, die in Tab. 20 wiedergegeben sind. Hier sind

Tab. 20.

Unterschiedsvergleichung für *A*.

R	r	M	R_g	M_1	$\sqrt{s}$
46,95	1	19,47	6,85	9,5	1,90
32,78	1	11,94	5,73	7,7	1,46
20,76	1	8,16	4,56	6,0	1,30
11,24	1	4,88	3,35	4,2	1,11
46,95	11,24	26,12	22,97	23,3	1,11
46,95	4,50	23,32	14,53	15,5	1,46
32,78	4,50	15,11	12,15	12,8	1,16

ebenfalls R und r nebst dem experimentell bestimmten M angegeben, ferner das aus Gleich. 45 berechnete R_g und das aus Gleich. 46 mit $x = 1{,}48$ berechnete M_1. Wie man sieht, ist M_1 durchweg gröfser als R_g und nähert sich also den gefundenen M mehr, die Abweichungen

sind hier jedoch überaus grofs, so dafs von der Gültigkeit der Gleich. 46 gar nicht die Rede sein kann.

Trotz des nachgewiesenen Mangels an Übereinstimmung der Berechnung mit der Messung sind wir dennoch durchaus nicht gezwungen, der von Ament gezogenen Konklusion beizutreten. Die gefundenen Werte von M sind nämlich mit einem sehr bedeutenden Zeitfehler behaftet, von dem sich leicht nachweisen läfst, dafs er die ganze Nichtübereinstimmung verursacht. In seinem verdienstlichen Werke: »Zur Analyse der Unterschiedsempfindlichkeit« wies G. E. Müller nach, dafs nicht jeder Zeitfehler sich eliminieren läfst, indem man nur die Zeitfolge der Reize umkehrt. Dies weifs Ament, der denn auch nach einem möglichen Zeitfehler späht; obschon er einen solchen an einem einzelnen Punkte findet, entgeht derselbe am entscheidenden Orte seiner Aufmerksamkeit aber gänzlich. Ich werde dies nun näher nachweisen und die nötigen Korrektionen des Zeitfehlers einsetzen.

Mit allen früheren Forschern auf diesem Gebiete übereinstimmend findet Ament, dafs zwei aufeinanderfolgende gleichgrofse Schallreize nicht dieselbe Empfindung hervorrufen; der zweite wird als stärker denn der erste aufgefafst. Bei der Bestimmung der Unterschiedsempfindlichkeit hat dies zur Folge, dafs man, je nachdem R oder r zuerst kommt, nicht denselben Wert für R erhält. Bezeichnen wir die beiden Werte von R als R_I, wenn R zuerst kommt, und als R_{II}, wenn r zuerst kommt, so mufs $R_I > R_{II}$ sein, denn kommt R zuerst, so wird das nachfolgende r eine verhältnismäfsig zu starke Empfindung geben, und R mufs folglich einen etwas gröfseren Wert erhalten, als der Fall sein würde, wenn man r nicht relativ zu stark auffafste. Kommt umgekehrt R zuletzt, so wird dasselbe als verhältnismäfsig stark aufgefafst, und die Differenz $R - r$ mufs folglich verhältnismäfsig klein sein, wenn R als nur ebenmerklich von r verschieden aufgefafst werden soll. Dafs R_{II} wirklich kleiner wird als R_I, geht auch deutlich aus Aments Tab. XV hervor, wo er diese Zeitfehler bespricht. Aus derselben Tabelle ist ebenfalls zu ersehen, dafs der Unterschied $R_I - R_{II}$ mit r anwächst. Dies heifst mit anderen Worten, dafs der Zeit-

fehler um so gröfser wird, je stärker die Reize sind. Die Zeitfolge zweier Schallreize, A und B, hat mithin den Einflufs, dafs der letztere, B, zu betrachten ist, als wäre er um eine mit B anwachsende Gröfse vermehrt. Man darf also nicht mit B rechnen, sondern mit $B + a \cdot B = B(1 + a) = B \cdot Q$, indem man $1 + a = Q$ setzt. Hier mufs Q der Natur der Sache zufolge > 1 sein, ob Q sonst aber ein konstanter Faktor ist, bleibt ganz unentschieden; es ist sehr wohl denkbar, dafs $Q = F(A, B)$. Wenden wir diese Betrachtung nun auf die Bestimmungen der Unterschiedsempfindlichkeit an, so sehen wir folgendes Verhalten. Kommt R zuerst, so finden wir für dasselbe den Wert R_I, der einem r entspricht, das als $r \cdot Q$ zu rechnen ist, weil r zuletzt kommt. Umgekehrt, wenn r zuerst kommt. Dann finden wir für R den Wert R_{II}, der als $R_{II} \cdot Q$ zu rechnen ist, weil R zuletzt kommt. Man erhält also zwei verschiedene Ausdrücke für die Unterschiedsempfindlichkeit: $R_I / r \cdot Q$ und $R_{II} \cdot Q / r$. Es ist nun ganz einleuchtend, dafs man den Zeitfehler Q nicht dadurch eliminiert, dafs man, wie Ament, das Mittel $(R_{II} + R_I) / 2$ nimmt. Die einzige Weise, wie Q sich eliminieren läfst, ist die, dafs man setzt:

$$\frac{R_I}{r \cdot Q} = \frac{R_{II} \cdot Q}{r}, \text{ woraus } Q = \sqrt{\frac{R_I}{R_{II}}}$$

Wird Q daher als $\sqrt{R_I / R_{II}}$ bestimmt, so kann man den gefundenen Wert entweder in $R_I / r \cdot Q$ oder in $R_{II} \cdot Q / r$ einsetzen, und in beiden Fällen wird man zu demselben Werte gelangen. Es leuchtet indes ein, dafs die drei Brüche:

$$\frac{R_I}{r \cdot Q}, \quad \frac{R_{II} \cdot Q}{r} \quad \text{und} \quad \frac{\frac{1}{2}(R_I + R_{II})}{r}$$

gewöhnlich so nahe aneinander fallen werden, dafs man nur einen unwesentlichen Fehler begeht, wenn man, wie es meistens geschieht, mit dem letzten statt mit einem der beiden anderen rechnet.

Ganz anders stellt sich dagegen die Sache, wenn man drei aufeinanderfolgende Reize hat. Ament benutzt hier zwei verschiedene Zeitfolgen, nämlich R, M, r und r, M, R. Für diese beiden Zeitfolgen findet er nur ganz unbedeutende Unterschiede der gefundenen Werte

von M[1], und er schliefst hieraus, dafs hier kein Zeitfehler vorkomme, so dafs er das Mittel der beiden Werte des M als den richtigen gebrauchen könne. Dieser Schlufs verrät wieder, dafs die Logik des Herrn Ament der von ihm behandelten Aufgabe nicht gewachsen ist. Denn freilich könnte es sich so verhalten, wie er annimmt, anderseits läfst sich aber die Möglichkeit nicht ausschliefsen, dafs ein Zeitfehler vorkommt, und dafs dieser in den beiden Zeitfolgen dieselbe Wirkung auf den Wert des M hat. In diesem Falle wird man also bei beiden Zeitfolgen für M dieselbe Gröfse finden, und die Folge dieses Umstands wird dann ganz einfach die, dafs der Zeitfehler sich hier nicht dadurch eliminieren läfst, dafs man das Mittel der Werte von M nimmt. Ament verfährt hier mit sonderbarem Leichtsinn, da er es unterläfst, die Haltbarkeit seiner Folgerung zu kontrollieren; durch einen einzelnen Versuch hätte er sich bald von seinem Irrtum überzeugen können. Findet sich nämlich kein Zeitfehler in den Zeitfolgen R, M, r und r, M, R, so mufs auch jede andre Zeitfolge, z. B. R, r, M denselben Wert von M herbeiführen. Hätte Ament nur eine solche Bestimmung unternommen, so würde er sogleich gesehen haben, dafs M in diesem Falle bedeutend geringeren Wert erhält als in den beiden erstgenannten Zeitfolgen, so dafs der Zeitfehler hier also ebenso wie bei zwei Reizen wirkt. Der Versuch ist aber insofern ganz überflüssig, da Merkel schon längst dargelegt hat, dafs bei drei successiven Schallreizen ein ähnlicher Zeitfehler entsteht wie bei zwei Reizen, indem der letzte in der Reihe stärker aufgefafst wird, als er thatsächlich ist[2].

---

[1] Vgl. Tab. XVI. An citiertem Orte S. 183.

[2] Die Abhängigkeit zwischen Reiz und Empfindung. Phil. Stud. Bd. X. S. 245 u. f. Wenn ich es vorzog, das Verhältnis auf die oben benutzte Weise auszudrücken, so geschah das ausschliefslich, um jede Andeutung einer bestimmten Theorie von der Ursache des Zeitfehlers zu vermeiden. Indes sagt Merkel (ibid. S. 246): »Bemerken will ich noch, dafs mir die Annahme näher liegen würde, die beiden ersten Reize würden geschwächt, der dritte in seiner wahren Gröfse aufgefafst.« Will man diese Auffassung zu Grunde legen, so müssen die vorhergehenden Reize also mit $1/S$ multipliziert werden, wo $S > 1$,

Gehen wir nun von dieser Thatsache aus, so können wir leicht zeigen, dafs die von Ament gefundenen Resultate völlig erklärlich sind. Da der letzte Reiz einer Reihe stärker aufgefafst wird, als er thatsächlich ist, kann man also nicht mit seiner wirklichen Gröfse rechnen, sondern mufs diese mit einem Faktor S multiplizieren, von dem wir vorläufig weiter nichts wissen, als dafs $S > 1$ ist[1]. Bei der Zeitfolge R, M, r wird r also wirken, als hätte es die Gröfse $S \cdot r$, und man mufs daher haben:

$$\frac{R}{M} = \frac{M}{S \cdot r}, \text{ woraus } M = \sqrt{S \cdot Rr} \quad \ldots . \text{ (Gleich. 47).}$$

Bei der Zeitfolge r, M, R ist R als $S \cdot R$ zu berechnen, und man erhält also:

$$\frac{SR}{M} = \frac{M}{r}, \text{ woraus } M = \sqrt{S \cdot Rr} \quad \ldots . \text{ (Gleich. 47).}$$

Man sieht also, dafs man in beiden Fällen zu demselben Werte von M kommt, was Ament gerade fand; seine Zahlen kommen einander jedenfalls so nahe, dafs die Abweichungen als zufällige Fehler zu betrachten sind[2]. Diese Übereinstimmung zeigt deutlich, dafs M mit einem Zeitfehler behaftet ist, der sich dadurch, dafs man das Mittel der durch die beiden Zeitfolgen erhaltenen Werte nimmt, nicht eliminieren läfst. Da Gleich. 47 ferner $M = R_g \cdot \sqrt{S}$ geschrieben werden kann, indem $R_g = \sqrt{R \cdot r}$ ist, sieht man hieraus, wie der Zeitfehler gerade zur Folge hat, dafs das experimentell gefundene M gröfser wird als das geometrische Mittel der Reize, was auch nach der Erfahrung der Fall ist. Da wir

---

führt man aber die Berechnungen unter dieser Voraussetzung durch, so kommt man zu denselben Ergebnissen, die wir oben fanden und unten (S. 115) finden werden. Es ist also einerlei, wie man hier rechnet.

[1] Ich bezeichne den Zeitfehler hier deshalb durch S und nicht wie oben durch Q, da keine Notwendigkeit vorliegt, dafs $S = Q$ wäre.

[2] Wenn Merkel (l. c S. 240 u. f.) nicht zu identischen Werten für die beiden Zeitfolgen gelangt, kann dies seinen Grund in der Art und Weise haben, wie er M bestimmt. Da es, wie Ament nachwies, verschiedene andere Verhältnisse gibt, die auf M Einflufs üben, ist es Merkel vielleicht nicht völlig gelungen, alle diese Einflüsse zu eliminieren. Aufserdem ist der Zeitfehler von dem Zeitraum zwischen den drei Reizen abhängig (vgl. unten S. 117); schon hierdurch kann die Verschiedenheit der Resultate erklärt werden.

aber, um von dem konstanten Tagesgeräusche zu korrigieren, jeden der gemessenen Reize um einen konstanten Addenden vergröfsern müssen, wird es streng genommen nicht Gleich. 47, sondern:

$$M = \sqrt{S \cdot (R + x)\,(r + x)} - x \quad \ldots \text{ (Gleich. 48)},$$

die für diese Versuche gültig ist. Da nun aber nach Gleich. 46:

$$(R + x)\,(r + x) = (M_1 + x)^2,$$

so erhält man durch Einsetzung dieses Ausdrucks:

$$M = (M_1 + x)\sqrt{S} - x = M_1 \sqrt{S} + x\,(\sqrt{S} - 1).$$

Da $S > 1$, ist auch $\sqrt{S} > 1$, und folglich wird das experimentell gefundene, mit dem Zeitfehler behaftete M gröfser als das aus Gleich. 46 berechnete M_1; die Richtigkeit hiervon geht auch aus Tab. 20 hervor. Es scheint also keinen Zweifel erleiden zu können, dafs Gleich. 48, in welchem dem thatsächlich vorkommenden Zeitfehler Rechnung getragen ist, die von Ament nachgewiesenen Eigentümlichkeiten völlig zu erklären vermag. Freilich ist hierzu zu bemerken, dafs es keineswegs gegeben ist, S werde sich als konstante Gröfse erweisen; es ist sehr wohl möglich, dafs S eine Funktion der Reize selbst ist. Dies scheint wenigstens aus den vorliegenden Messungen hervorzugehen. Aus Gleich. 48 erhalten wir nämlich folgenden Ausdruck für $\sqrt{S}$:

$$\sqrt{S} = \frac{M + x}{\sqrt{(R + x)\,(r + x)}} = \frac{M + x}{M_1 + x}$$

Nimmt man hier $x = 1{,}48$ und setzt man die aus Tab. 20 genommenen zusammengehörenden Werte für M und M_1 ein, so erhält man die in derselben unter der Überschrift $\sqrt{S}$ angeführten Gröfsen. S ist also keine konstante Gröfse; sie wächst mit R und mit abnehmenden Werten von r; annäherungsweise ist sie dem log. (R/r) proportional. Dieser Umstand, dafs der Zeitfehler eine Funktion eben der Gröfse der Reize ist, erscheint recht merkwürdig und scheint anzudeuten, dafs der Zeitfehler u. a. von einer »Bahnung« (siehe den Abschnitt »Dynamische Erklärung der Aufmerksamkeit«) herrührt, welche jede Empfindung zu gunsten der nachfolgenden ausführt. Dies schliefst aber durchaus nicht aus, dafs auch die abnehmende Stärke der Erinnerungsbilder der

zuerst gehörten Empfindungen eine wesentliche Rolle spielt[1]. Im Gegenteil scheint die von Stern aufs neue festgestellte Thatsache, dafs der Zeitfehler bei einem Zwischenraum von 6 Sekunden zwischen den Empfindungen am kleinsten ist[2], zu zeigen, dafs wir hier mit einer ziemlich komplizierten Erscheinung zu schaffen haben, die wahrscheinlich von mehreren zusammenwirkenden Ursachen herrührt. Nimmt man an, dafs die Erinnerungsbilder einigermafsen gleichmäfsig an Stärke abnehmen, und dafs die Bahnung sich mit abnehmender Stärke während eines Zeitraums von ungefähr 6 Sekunden geltend macht, so wird ein Zusammenwirken dieser beiden Ursachen gerade die empirisch gefundenen, anscheinend periodischen Variationen des Zeitfehlers zur Folge haben. Es wird offenbar ein sehr interessantes Ziel künftiger Untersuchungen sein, die Gröfse und die Ursachen des Zeitfehlers völlig ins reine zu bringen, wir können uns hier aber natürlich nicht darauf einlassen. Wir müssen uns darauf beschränken, festzustellen, was für uns die Hauptsache ist:

D u r c h A n w e n d u n g d e r M e t h o d e d e r m i t t l e r e n A b s t u f u n g e n a u f d i e S c h a l l e m p f i n d u n g e n w i r d e i n Z e i t f e h l e r e i n g e f ü h r t, d e r s i c h n i c h t e l i m i n i e r e n l ä f s t, w e n n m a n M n u r d u r c h d i e b e i d e n Z e i t f o l g e n R, M, r u n d r, M, R b e s t i m m t. D i e s e r Z e i t f e h l e r b e w i r k t, d a f s m a n i n j e d e r d e r b e i d e n Z e i t f o l g e n d e n s e l b e n W e r t f ü r M f i n d e t, u n d d a f s d e r a u f d i e s e W e i s e g e f u n d e n e W e r t g r ö f s e r w i r d a l s d e r a u s d e m k o r r i g i e r t e n W e b e r s c h e n G e s e t z e b e r e c h n e t e. Bis es e n t s c h i e d e n d a r g e t h a n w i r d, d a f s d e r Z e i t f e h l e r d i e A b w e i c h u n g d e r B e r e c h n u n g v o n d e r M e s s u n g n i c h t v ö l l i g z u e r k l ä r e n v e r m a g, i s t e s d e s h a l b g a n z u n b e r e c h t i g t, i n d i e s e r A b w e i c h u n g e i n Z e i c h e n z u e r b l i c k e n, d a f s d i e e b e n m e r k l i c h e n U n t e r s c h i e d e k e i n e g l e i c h g r o f s e n E m p f i n d u n g s u n t e r s c h i e d e w ä r e n.

---

[1] Phil. Stud. Bd. VII. S. 205 u. f.

[2] Die Wahrnehmung von Tonveränderungen. Zeitschr. f. Psych. u. Phys. Bd. XXI. S. 377 u. f.

Es hat indes nur geringe Wahrscheinlichkeit, dafs der Zeitfehler nicht genügen sollte, um die genannte Abweichung zu erklären. Denn wenn man rücksichtlich der Schallempfindungen zu der Annahme gezwungen werden sollte, dafs die ebenmerklichen Unterschiede nicht gleichgrofs wären, so müfste konsequent auch angenommen werden, dafs dies für Lichtempfindungen gölte. Auf diesem Gebiete gibt es für eine solche Annahme aber durchaus keinen Anhaltspunkt. Für Lichtempfindungen gilt nämlich nicht das Webersche Gesetz, sondern das durch Gleich. 28 (oder Gleich. 43) ausgedrückte Unterscheidungsgesetz. Geht man nun davon aus, dafs die ebenmerklichen Unterschiede gleichgrofs sind, so folgt aus Gleich. 28, dafs man für zwei gleichgrofse Empfindungsunterschiede das in Gleich. 30 ausgedrückte Verhältnis zwischen den drei Reizen haben mufs. Es wurde aber dargethan, dafs Gleich. 30 für die nach der Methode der mittleren Abstufungen ausgeführten Messungen gültig ist (S. 77 u. f.). Hieraus folgt nun geradezu die Richtigkeit unserer Voraussetzung: die ebenmerklichen Unterschiede sind gleichgrofse Empfindungsunterschiede.

Da der aus dem Unterscheidungsgesetze für Lichtempfindungen abgeleitete Ausdruck für gleichgrofse Empfindungsunterschiede mit den vorliegenden Messungen nach der Methode der mittleren Abstufungen übereinstimmt, so ist hierdurch hinsichtlich des Lichtsinnes dargethan, dafs ebenmerkliche Unterschiede gleichgrofs sind.

DIE ERGOGRAPHISCHEN METHODEN.

Ergographie mit konstantem und mit variablem Gewichte. Die ergographischen Untersuchungen haben den Zweck, die Gesetze für die Gröfse derjenigen Arbeit zu finden, welche ein Muskel oder eine Muskelgruppe unter bestimmten Verhältnissen auszuführen vermag. Bei diesen Untersuchungen verfuhr man bisher auf zweifache Art, indem man teils eine rein physiologische,

die myographische, Methode anwandte, bei der das Versuchsmaterial tote Tiere oder einzelne präparierte Muskeln waren, teils eine psychophysiologische Methode, die ergographische in engerem Sinne, benutzte, bei der das Versuchsmaterial lebendige Menschen waren. Jede dieser Methoden hat ihre Vorzüge und ihre Mängel. Bei der myographischen Methode ist man der Natur der Sache zufolge vollständig vor nicht zu berechnenden, störenden Faktoren geschützt, man beherrscht alle äufseren Verhältnisse, den Stoffwechsel des Muskels und die Stärke der motorischen Innervationen. Die Methode hat aber den unvermeidlichen Übelstand, dafs der Muskel nach Verlauf kurzer Zeit, die sich höchstens nach Stunden rechnen läfst, stirbt. Sie gestattet deshalb nur in sehr geringem Umfange vergleichende Untersuchungen über den Einflufs verschiedener Verhältnisse auf denselben Muskel. Derartige Versuche lassen sich dagegen nach unbegrenztem Mafsstabe am lebendigen Menschen anstellen, anderseits hat man hier aber alle Mifslichkeiten zu bekämpfen, die bei jeder Art von Versuchen an Menschen unvermeidlich sind, nämlich die zufällige, gröfsere oder geringere Disposition, die plötzlichen, durch äufsere oder innere Umstände veranlafsten Schwankungen der Aufmerksamkeit, die Unsicherheit der Selbstbeobachtung, die besonders hier die genaue Messung der motorischen Innervationen ersetzen mufs, u. s. w. Hieraus folgt, dafs jede der beiden Methoden ihre Gebiete hat, wo nur sie allein zur Anwendung kommen kann, und dafs beide sich auf den gemeinschaftlichen Gebieten ergänzen und supplieren können; es sind in der That auch bedeutende Resultate durch das Zusammenwirken der beiden Methoden erzielt worden.

Es kann hier keine Rede davon sein, eine auch nur kürzere Übersicht der bisher durch diese Untersuchungen gewonnenen Resultate zu geben; dazu ist die bereits vorliegende Litteratur gar zu umfangreich. Aufserdem wurde eine solche geschichtliche Darstellung vor kurzem von J. Joteyko[1] gegeben; an diese Arbeit, die über-

---

[1] Revue générale sur la fatigue musculaire. L'année psychologique. Bd. V. Paris 1899.

dies ein ziemlich ausführliches Litteraturverzeichnis umfafst. wende man sich daher, wenn man sich mit der Lage der Sache bekannt zu machen wünscht. Wir haben um so weniger Grund, einen geschichtlichen Bericht über das bis jetzt Vorliegende abzustatten, da das meiste desselben für unsere speziellen Untersuchungen ohne Bedeutung ist. Was unter den gewonnenen Resultaten im Folgenden zur Anwendung kommt, werden wir, je nachdem es notwendig ist, zu rechter Zeit erklären. Viel wird es aufserdem nicht, da alle früheren Untersuchungen nach einer Versuchsanordnung angestellt wurden, die an und für sich sehr gut sein mag, die sich aber nicht zur Lösung derjenigen Probleme eignet, welche uns hier zunächst interessieren. Sowohl die myographischen als die eigentlich ergographischen Versuche wurden bisher nämlich auf die Weise ausgeführt, dafs man den arbeitenden Muskel auf ein konstantes Gewicht wirken liefs. Wird nun der Muskel innerviert — entweder auf künstliche Weise mittels eines Induktionsstromes, oder auf natürliche Weise, vom Zentralorgan her — und kontrahiert er sich hierdurch möglichst stark, so wird er mithin das Gewicht heben. Durch die auf diese Weise ausgeführte Arbeit wird der Muskel natürlich ein wenig ermüden, und durch fortwährende Wiederholung derselben Innervation in regelmäfsigem Takte gelangt man früher oder später bis an den Punkt, wo der Muskel so stark ermüdet ist, dafs er die Last nicht mehr bis zur völligen Höhe zu heben vermag. Jede folgende Kontraktion wird nun kleiner als die zunächst vorhergehende, bis der Muskel schliefslich gar nicht im stande ist, die Last zu heben. Es ist leicht zu ersehen, dafs man hier an den fortwährend abnehmenden Höhen, bis zu denen die Last gehoben wird, ein Mafs für die wachsende Ermüdung hat. Und nimmt man nur auf die ganze Summe von Arbeit Rücksicht, welche der Muskel von Anfang an bis er nicht mehr kann, ausführt, so wird man an dieser totalen Arbeitsmenge ein Mafs für die Arbeitsfähigkeit des Muskels haben. Auf diese Weise kann man die Arbeitsfähigkeit des Muskels unter verschiedenen Verhältnissen untersuchen, was wenigstens bei ergographischen Versuchen an Menschen möglich

ist. Mossos[1] und später Kraepelins[2] Untersuchungen haben gezeigt, wie bedeutende Resultate sich auf diesem Wege erreichen lassen.

Indes klebt diesen ergographischen Messungen mit konstantem Gewicht doch ein Mangel an, nämlich der, dafs der Muskel bei jeder Kontraktion nicht die möglichst grofse Arbeit verrichtet, die er im gegebenen Augenblick zu leisten vermag. Nimmt man die Last etwas kleiner als das maximale Gewicht, das der Muskel überhaupt bis zur vollen Höhe zu heben vermag, so werden die ersten Muskelkontraktionen offenbar weniger Arbeit liefern, als der Muskel geleistet haben würde, wenn die Last gröfser gewesen wäre. Und hören schliefslich die Kontraktionen auf, weil der Muskel ermüdet ist, so würde er noch eine grofse Menge Arbeit geliefert haben können, wenn er mit einem geringeren Gewichte belastet wäre. Wie diese Versuche gewöhnlich angestellt wurden, erhält man also sowohl am Anfange als am Schlusse des Versuches gar zu geringe Arbeitsleistung. Dieser Einwurf gegen Mossos Ergographen mit konstantem Gewicht wurde früher bereits von Binet[3] erhoben und veranlafste den letztgenannten, einen Ergographen mit variablem Gewichte zu konstruieren, der das Gewicht durch eine mehr oder weniger gespannte Feder ersetzte, so dafs der Muskel bei jeder einzelnen Kontraktion sein Maximum der Arbeit leistet. Dafs diese Anordnung bei gewissen Untersuchungen geradezu notwendig ist, werden wir sogleich sehen; es scheint mir indes, dafs man Mossos Apparat nicht mit Binet als falsch konstruiert betrachten kann, da derselbe bei zahlreichen Untersuchungen sehr befriedigend zu wirken vermag.

Der Zweck der im Folgenden behandelten ergographischen Untersuchungen sollte, wie in der Einleitung erwähnt, der sein, wo möglich ein mechanisches Mafs unserer Bewufstseinszustände zu finden. Nun kann ein

---

[1] Mosso, Die Ermüdung. Leipzig 1892.

[2] Hoch & Kraepelin, Über die Wirkung der Theebestandteile auf körperliche und geistige Arbeit. Kraepelin, Psycholog. Arbeiten. Bd. I. Leipzig 1896.

[3] Un nouvel Ergographe. L'année psychologique. Bd. IV. Paris 1898.

Bewufstseinszustand wahrscheinlich nur auf eine einzige Weise auf die Muskelarbeit einwirken, dadurch nämlich, dafs er auf die zentrale Innervation der Muskeln einwirkt. Soll man aber den Einflufs eines psychischen Zustandes auf die Innervation spüren können, so mufs deren Gröfse offenbar vorher bekannt sein. Wir haben jedoch kein direktes Mafs für die Gröfse der Innervation oder eine Empfindung von derselben. Es gibt nur eine einzige Gröfse der Innervation, die wir zu jeder Zeit mit Sicherheit zu leisten vermögen, und das ist die maximale. Natürlich ist es keineswegs gegeben, dafs diese maximale Anspannung unter allen Umständen wirklich einer Innervation von konstanter Gröfse entspricht; jedenfalls liefse es sich sehr wohl denken, wie Ermüdung und dgl. mit sich bringen würde, dafs durch möglichst grofse Anspannung von seiten des Individuums immer mehr abnehmende Innervationen hervorgerufen würden. Dies wäre natürlich vorher zu untersuchen, so dafs die Bedingungen, unter welchen man annehmen dürfte, dafs der möglichst grofsen Anstrengung von seiten des Individuums wirklich auch eine konstante Innervation entspreche, uns bekannt wären. Selbst wenn wir diese Bedingungen aber kennten, wäre die Sache damit doch nicht in Ordnung. Damit man bei jeder einzelnen Muskelkontraktion maximal innervieren kann, mufs noch eine andre Forderung erfüllt sein, nämlich die, dafs der Rezeptionsapparat, der Ergograph, den notwendigen Widerstand leistet. Druck und Gegendruck müssen stets gleichgrofs sein. Man kann nicht mit einer Kraft von 10 Kilo wirken, wenn der Widerstand nur 5 Kilo beträgt. Folglich mufs der Ergograph notwendigerweise so eingerichtet sein, dafs sein Widerstand gegen die Muskelkontraktion immer mehr wächst, je mehr der Muskel verkürzt wird, und bevor die gröfste Verkürzung erreicht ist, mufs der Widerstand so grofs geworden sein, dafs der Muskel ihn nicht zu überwinden vermag. Ein derartiger Ergograph wird offenbar jede beliebige Arbeit annehmen können, einerlei ob diese bei dem kräftigen und frischen Muskel sehr grofs ist, oder ob sie wegen Ermüdung des Muskels nur klein wird. Die Anwendung eines Apparats dieser Art wird also die erste und unumgängliche Bedingung, damit

unsere Untersuchungen zu dem gewünschten Resultate führen können. Ich werde nun vorerst den von mir benutzten Apparat beschreiben.

Am bequemsten wäre es ja gewesen, ganz einfach den von Binet konstruierten Ergographen zu benutzen. Dies that ich jedoch nicht, weil es mir scheint, dafs derselbe noch an gewissen Mifslichkeiten leidet, die für meine Versuche unheilbar werden könnten. Sowohl an Binets als an Mossos Ergographen arbeitet nur ein einzelner Finger. Hand und Arm müssen also völlig fest liegen, damit man sicher sein kann, dafs die Arbeit wirklich von den Muskeln des Fingers ausgeführt wird. Vermag der Arm sich nur ein ganz klein wenig auf der Unterstützung zu bewegen, so wird es eine leichte Sache sein, die Last zu heben, ohne den Finger zu krümmen, indem man nur den Arm hin und her gleiten läfst. Natürlich hat sowohl Mosso als Binet dies längst eingesehen und dadurch zu verhindern gesucht, dafs der Arm unbeweglich fest an die Unterlage gespannt wurde. Dies ist aber offenbar eine ziemlich mifsliche Sache. Denn wie wir wissen, nimmt das Volum des Arms wegen des vermehrten Blutzuflusses während der Muskelarbeit ziemlich bedeutend zu. Ist der Arm daher von Anfang an völlig fest gespannt, so scheint mir hieraus folgen zu müssen, dafs die befestigenden Bänder und Riemen während der Arbeit leicht drücken können. Ein solcher Druck wird aber sowohl unangenehm werden als auch durch Hemmung der Blutzirkulation direkt auf die Muskelarbeit influieren können. Von einem idealen Ergographen ist zu verlangen, dafs er Hand und Arm völlig frei läfst, so dafs das Individuum in jedem Augenblicke die Stellung verändern kann, wenn die anfangs gewählte sich während des Verlaufs der Arbeit als weniger zweckmäfsig erweisen sollte. Diese Aufgabe suchte ich durch eine kleine Modifikation des sogenannten Regnierschen Dynamometers zu lösen, das ich aufserdem zur graphischen Registrierung der ausgeführten Arbeit einrichtete. Freilich hat auch das Regniersche Dynamometer seine Übelstände, und diese sind zum Teil sogar so grofs, dafs der Apparat jetzt nur selten mehr benutzt wird; diese Fehler lassen sich aber vermeiden. Um dies nachzuweisen, werde ich

nun erst die Form beschreiben, die ich dem Apparate gab, und darauf auseinandersetzen, weshalb die bekannten Mängel des Dynamometers als durch meine Konstruktion beseitigt zu betrachten sind.

Feder-Ergograph für den Druck der Hand. Fig. 2 gibt eine Skizze des Apparats in $^1/_5$ nat. Gröſse, so wie er sich von oben gesehen zeigt. Auf einem 60 cm langen und 15 cm breiten Brette ist eine etwa 5 cm hohe feste Leiste *L* angebracht. Diese Leiste ist an der einen Seite abgerundet, so daſs sie der gegen sie angepreſsten Handfläche eine bequeme Stütze gewährt. In den quadratischen Holzklotz *K*, der mit dem Brette fest verbunden ist und gleiche Höhe wie die Leiste *L* hat, ist eine starke Federwage *F* eingesenkt, welche Züge bis 100 Kilogramm anzeigen kann. Die Federwage ist, wie die Figur zeigt, mittels eines Ringes an einen soliden Haken *A* befestigt; unten ist in der Wage ein anderer Haken *C* angebracht, der an seinem unteren, geradlinigen Ende mit einem Schraubengang versehen ist. Diese Schraube ist durch den Bügel *B* hindurch geführt, der den Handgriff *H* trägt. Durch Vor- oder Rückwärtsschrauben des Bügels am Haken *C* kann man den Abstand zwischen dem Handgriff und der Leiste *L* variieren, so daſs die an *L* gestützte Hand den Handgriff mit den Fingern bequem umfassen kann. (Siehe Fig. 3.) Werden nun die Finger gekrümmt, so wird ein Zug in *H*, mithin auf die Federwage geübt werden; die Gröſse dieses Zuges gibt der Zeiger *V* an. Auſser diesem Zeiger findet sich ein Maximumzeiger V_1, der von *V* während der Bewegung des *V* vorgeschoben, aber nicht mit zurückgenommen wird; er zeigt also den gröſsten erreichten Druck an. Die graphische Aufzeichnung geschieht übrigens folgendermaſsen. An der Achse, um die sich der Zeiger *V* dreht, ist oben eine exzentrische Scheibe *S* angebracht.

Fig. 2.

Diese dreht sich also zugleich mit *V* und ist so eingestellt, dafs sie während ihrer Umdrehung einen immer mehr wachsenden Druck auf die Gummimembran einer gewöhnlichen Pelotte *T* übt. Um die Membran nicht abzuschleifsen und um den Druck gleichmäfsig zu verteilen, ist an der Mitte der Membran eine dünne, harte hölzerne Scheibe (in Fig. 3 sichtbar) angebracht, gegen die das Exzentrik andrückt. Die Bewegungen der Gummimembran werden mittels Lufttransmission auf einen Mareyschen Schreibtambour übertragen, der die Gröfse des Drucks auf der Walze des Kymographen aufzeichnet.

Um den auf der Walze registrierten Bewegungen passende Gröfse zu geben, ist es notwendig, das Exzentrik einzustellen. Zu diesem Zwecke ist die Scheibe mit einem rektangulären Ausschnitte versehen, der in einen viereckigen Zapfen oben an der die Scheibe tragenden Achse pafst. Wenn man die zirkuläre Scheibe am Zapfen vor- und rückwärts schiebt, kann man die Exzentrizität innerhalb sehr weiter Grenzen verändern, mithin also auch den Druck, den die Scheibe während ihrer Umdrehung auf die Gummimembran übt; durch Probieren findet man dann leicht eine geeignete Gröfse der Exzentrizität. Die Scheibe wird mittels einer Schraubenmutter in der rechten Stellung festgehalten. Macht man die Exzentrizität einigermafsen grofs, so bedarf es offenbar nur einer sehr geringen Vergröfserung der Bewegung durch den Schreibhebel auf dem Kymographen; hierdurch sind die Eigenbewegungen des Schreibhebels leicht zu vermeiden.

Von wesentlicher Bedeutung für die Anwendbarkeit des Ergographen ist, wie oben berührt, der Umstand, dafs der Handgriff *H* nur einen sehr kurzen Weg durchläuft, selbst wenn sehr beträchtliche Drucke ausgeübt werden. Dies ist dadurch leicht zu erreichen, dafs die Feder der Wage hinlänglich steif gemacht wird. Die Feder des hier besprochenen Apparats ist aus zwei parallel liegenden, fest miteinander verbundenen, schraubenförmigen Federn zusammengesetzt. Indem man eine doppelte Feder anwendet und jeder einzelnen Feder eine grofse Anzahl Windungen gibt, erzielt man, dafs die Feder sich während des wachsenden Druckes

regelmäfsig, dem Drucke proportional verlängert. In ihrer Totalität ist die Verlängerung nur unbedeutend; bei einem Zuge von 60 Kilogramm — dem gröfsten, bei meinen Versuchen vorkommenden — ergab sich eine Verlängerung um 3 mm. Da der Handgriff sich also, selbst bei den gröfsten Zügen, der festen Leiste nur um wenige Millimeter nähert, verändert die Stellung der Finger sich nur äufserst wenig, und es wird deshalb möglich, sowohl die gröfsten als die kleinsten Arbeitsmengen auf den Apparat zu übertragen. Wie man nun aus den auf dem Kymographen aufgezeichneten Drucken die ausgeführte Arbeit berechnen kann, wird später erklärt werden, wenn wir zur Bearbeitung des Versuchsmaterials kommen.

Die wesentlichsten Einwürfe, die im Laufe der Zeit gegen das sogenannte Regniersche Dynamometer erhoben wurden, finden sich gesammelt in einer kleinen Abhandlung von Binet & Vaschide: »Critique du dynamomètre ordinaire[1].« Ich gehe diese Einwürfe einzeln durch und weise nach, weshalb sie bei der Modifikation, die ich dem Apparate gegeben habe, ohne Belang sind.

1. »Der Apparat ruft im Innern der Hand einen Druckschmerz hervor, der es der Versuchsperson verwehrt, mit voller Kraft zu arbeiten.« — Diesen Übelstand birgt allerdings das gewöhnliche Dynamometer, wo der Druck der Hand auf eine gebogene, schmale Stahlfeder wirkt. Bei meinem Ergographen wurde nie eine Unannehmlichkeit dieser Art beobachtet, die denn auch schwierig entstehen kann, wenn die Leiste und der Handgriff nur hinlänglich breit und abgerundet sind. Bei andauerndem Arbeiten mit dem Apparat kann sich freilich, wie bei aller anderen manuellen Arbeit, an der inneren Seite der Finger ein Bläschen bilden, ein derartiges Ereignis kann aber höchstens bewirken, dafs die Versuche 24 Stunden ausgesetzt werden.

2. »Einige Menschen schwitzen stark an den Händen, wenn sie arbeiten; der Apparat kann hierdurch ins Gleiten geraten, so dafs kein maximaler Zug ausgeübt wird.« — Auch dies gilt nur, wenn die Hand auf

---

[1] L'année psychologique. IV. 1898.

Metallfedern wirkt; Holz dagegen wird von einer feuchten Hand fester ergriffen.

3. »Vielen Menschen fällt es schwer, sogleich die rechte Stellung zu finden, die sie der Hand geben sollen; man erhält deshalb nicht immer den maximalen Druck gleich beim ersten Versuche.« — Dieser Einwurf kann freilich Bedeutung haben, wenn man eine einzelne Messung der Stärke des Handdruckes an mehreren, zufällig versammelten Individuen anzustellen wünscht. Handelt es sich dagegen um eine lange Zeit hindurch fortgesetzte Versuchsreihe mit einzelnen, bestimmten Personen, so wird es sicher ganz unwesentlich, ob die ersten paar Züge maximal sind oder nicht. Überdies fordert der Apparat eine Einstellung für jede einzelne Person, indem die Entfernung des Handgriffes von der Leiste der Gröſse der Hand angepaſst werden muſs; man muſs daher stets mit einigen vorläufigen Versuchen anfangen, um die rechte Stellung zu finden. Hat man erst für jede einzelne Versuchsperson (V-P) die rechte Entfernung des Handgriffes von der Leiste ein für allemal bestimmt, so wird man mit geübten Individuen immer davon ausgehen können, daſs die folgenden Versuche mit maximalen Drucken beginnen, was die Erfahrung auch bestätigt.

4. »Bei dem Drucke der Hand handelt es sich nicht um die Arbeit eines einzelnen Muskels, sondern um das Zusammenspiel einer groſsen Menge von Muskeln. Der ausgeführte Druck ist deshalb nicht nur von der Stärke der Muskeln abhängig, sondern auch von der Behendigkeit, mit welcher ihre Koordination bewerkstelligt wird. Auch aus diesem Grunde ist es denkbar, daſs die V-P den maximalen Druck nicht sogleich erreicht, sondern erst, wenn sie den Apparat auf rechte Weise ergreift.« — Dieser Einwurf ist ebenso wie der vorige als bedeutungslos zu betrachten, sobald von andauernden Versuchsreihen mit einzelnen V-P die Rede ist. Alle psychologischen Versuche erfordern bekanntlich eine Einübung der V-P, so daſs ähnliche Einwürfe sich streng genommen gegen sämtliche existierende psychophysische und psychophysiologische Meſsapparate erheben lieſsen.

5. »Wenn man, z. B. um die Muskelermüdung zu

untersuchen, eine Reihe aufeinanderfolgender Drucke ausführt, so ist die Möglichkeit nicht ausgeschlossen, dafs bald eine, bald eine andere Muskelgruppe in Thätigkeit tritt. Hierdurch bekommen die für den Augenblick unthätigen Muskeln Zeit zum Ausruhen, so dafs sie später wieder mit erneuter Kraft anfassen können, und folglich wird das Bild, das man von der fortschreitenden Ermüdung erhält, ein völlig falsches werden.« — Diese Betrachtung bewog Mosso, seinen Ergographen so zu konstruieren, dafs nur ein einzelner Finger arbeitet, weshalb man annehmen mufs, dafs gegenseitige Unterstützung verschiedener Muskelgruppen ausgeschlossen ist. Es scheint mir indes, dafs die genannte Gefahr nur

Fig. 3.

auf dem Papiere existiert; in der Praxis ist es ganz einfach unmöglich, systematisch einige Muskeln ruhen zu lassen, während andere arbeiten. Fafst man den Handgriff mit den vier Fingern an, und bestrebt man sich ehrlich und redlich, den möglichst grofsen Zug zu üben, so müssen alle Finger zugleich gebraucht werden. Mit zwei Fingern allein zu arbeiten, während die anderen ruhen, ist eine äufserst schwierige Sache, die sich überdies sogleich durch eine starke Verminderung des Zuges verrät. Folglich wird man hierdurch wohl kaum jemals getäuscht werden können; denn selbst wenn eine V-P von Anfang an die Methode systematisch benutzte, würde dies sich sogleich durch den höchst ungewöhnlichen Verlauf seiner Ergogramme kundgeben. — Eine Vorsichtsmafsregel ist jedoch zu beachten: der Daumen mufs auf der Leiste neben den vier anderen Fingern liegen. Hält man ihn nämlich hinter der

Leiste, wie in Fig. 3 gezeigt, so kann man leicht durch kleine Drucke mit diesem Finger die anderen in ihrer Arbeit unterstützen, wenn sie ermüdet sind. Es ist also genau zu beachten, dafs der Daumen richtig liegt; geschieht dies aber, so ist wohl kaum Gefahr vorhanden, dafs die Ergogramme falsche Bilder von der Entwickelung der Ermüdung geben sollten.

Einen Übelstand hat der hier beschriebene Ergograph selbstverständlich mit allen Apparaten, bei denen Lufttransmission angewandt wird, gemein: die benutzten Gummimembranen erschlaffen im Laufe der Zeit, wodurch die auf den Kymographen gezeichneten Kurven sich verändern. Da es sich aber äufserst leicht kontrollieren läfst, ob einem bestimmten Drucke, z. B. 60 Kilo, stets dieselbe Exkursion des Schreibhebels entspricht, und da eine Abweichung hiervon sich leicht korrigieren läfst, hat dieser Mangel keine grofse Bedeutung. Jeder Mefsapparat mufs, wenn er unablässig benutzt wird, zuweilen aufs neue geprüft werden.

Die Bearbeitung des Materials. Bei allen im Folgenden zu besprechenden Versuchen wurden stets eine gröfsere oder kleinere Reihe maximaler Muskelanstrengungen in bestimmtem Takte ausgeführt. Da der Takt in den meisten Fällen von wesentlicher Bedeutung ist, war es notwendig, die Zeit auf der Walze aufzuzeichnen, um später kontrollieren zu können, ob der Takt auch gehalten wurde. Die Registrierung der Zeit auf der Walze des Kymographen geschah auf die im 1. Teile dieses Werkes S. 6—7 näher beschriebene Weise. Um Raum zu sparen, wurde der Kymograph in sehr langsame Bewegung gesetzt, ca. 1,7 mm pr. Sekunde. Bei so langsamer Umdrehung war die Geschwindigkeit freilich keineswegs konstant, dies hatte aber nicht viel zu sagen, da zugleich die Zeit eingezeichnet wurde. Von den unter solchen Verhältnissen aufgezeichneten Ergogrammen zeigt Pl. IX zwei genau in natürlicher Gröfse wiedergegebene Beispiele. Der Takt war verschieden, wie die Figur zeigt; A wurde bei 12 Zügen pr. Min., B bei 40 Zügen pr. Min. ausgeführt. Der Kontrolle wegen ist unter A die hinzugehörende Registrierung der Zeit angegeben; jede Marke entspricht 1,5 Sekunden, und an der verschiedenen Länge der Zeitmarken kann

man ohne Schwierigkeit sehen, dafs die Umdrehung der Walze keineswegs gleichmäfsig war. Übrigens sieht man am Ergogramme B eine Eigentümlichkeit, von der in A höchstens Andeutungen vorkommen, dafs nämlich die Niveaulinie sich anfangs stark senkt bis auf ein Minimum, wo sie stehen bleibt. Sobald die Arbeit aufhört, steigt die Niveaulinie schnell wieder bis zur ursprünglichen Höhe. Dies im Verein mit dem Umstand, dafs die Senkung um so entschiedener wird, je geschwinder die einzelnen Züge aufeinander folgen, zeigt mit genügender Deutlichkeit, dafs die Senkung von den Gummimembranen herrührt, die eine gewisse Zeit verlangen, um in ihre ursprüngliche Lage zurückzukehren. Dies wird durch langsam aufeinanderfolgende Züge erreicht; deshalb zeigt Pl. IX, A nur eine sehr geringe Senkung, während diese in B stark hervortritt.

Es wird nun vor allen Dingen notwendig, zu entscheiden, welchen Einflufs die besprochene Senkung der Niveaulinie des Ergogramms auf die Gröfse der einzelnen Exkursion hat. Mit einer für den praktischen Gebrauch genügenden Genauigkeit läfst dies sich folgendermafsen machen. Man führt in schnellem Takte eine Reihe gleichgrofser Züge am Ergographen aus; arbeitet man mit beiden Händen, so kann man ohne Schwierigkeit ziemlich grofse Züge (z. B. 60 Kilo) leisten, und sie fast genau auf derselben Gröfse halten. Da die Drucke gleichgrofs sind, sollten auch die am Kymographen aufgezeichneten Exkursionen gleichgrofs sein, und das müfsten sie notwendigerweise auch werden, wenn die Niveaulinie nicht sänke. Es zeigt sich indes, dafs sogar ein sehr bedeutendes Sinken keinen Einflufs auf die Gröfse der einzelnen Exkursionen hat. Durch zahlreiche, stark variierte Proben habe ich mich davon überzeugt: dafs einem Drucke von bestimmter Gröfse stets eine konstante Exkursion am Kymographen entspricht, ohne Rücksicht auf das Niveau, in welchem das Ergogramm sich gerade befindet. Hierdurch wird die Ausmessung des Ergogramms offenbar wesentlich erleichtert; man braucht nur die Gröfse der einzelnen Exkursionen zu messen, ihre Lage auf dem Papier ist gleichgültig.

Unser nächstes Werk wird nun die Bestimmung,

wie viele Millimeter Exkursion einer bestimmten Anzahl Kilogramm Druck entsprechen. Proportionalität der Gröfse des Drucks mit der der Exkursion läfst sich nicht erwarten, da das Abhängigkeitsverhältnis zwischen den beiden Gröfsen teils durch die Exzentrizität der Scheibe, teils durch die hierdurch verursachte Spannung der Gummimembranen bestimmt wird; es bleibt folglich nichts andres übrig, als rein empirisch die zusammengehörenden Werte für eine Reihe verschiedener Fälle zu finden und hieraus die dazwischenliegenden zu berechnen. Durch die Versuche erhielt ich folgende Reihe:

Druck	10	20	30	40	50	60	Kilogramm,
Exkursion	10	22	36	52	65	78	Millimeter,

welche Skala selbstverständlich nur für die gewählte Einstellung des Exzentriks, des Schreibhebels u. s. w. gültig ist. Es ist indes mit keiner besonderen Schwierigkeit verbunden, an gleichartig gebauten Apparaten dieselbe Einstellung zuwege zu bringen, so dafs man bei den verschiedenen Apparaten dasselbe Verhältnis zwischen Druck und Exkursion erhält. Bei mehreren der im Folgenden besprochenen Versuche wurden zwei Ergographen angewandt, und es gelang mir leicht, beide so einzustellen, dafs die oben angeführte Skala für alle beide galt. Dies ist gewifs nicht ohne Bedeutung, da man alsdann für alle Ergogramme dieselbe Reduktionstabelle benutzen kann.

Hiermit sind wir jedoch noch nicht fertig, denn es kommt nicht darauf an, die Gröfse des Druckes, sondern die hierdurch verrichtete Arbeit zu bestimmen. Diese findet man indes mittels folgender Betrachtung. Da die Feder der Federwage sich dem Drucke proportional verlängert, wird der Weg, längs dessen der Widerstand überwunden wird, sich berechnen lassen, sobald der einem einzelnen, bestimmten Druck entsprechende Weg bekannt ist. Da nun, wie oben erwähnt, einem Druck von 60 Kilogramm eine Bewegung von 0,3 cm entspricht, hat man also, wenn der Druck d und der Weg v genannt werden: $v/d = 0{,}3/60$ oder $v = 0{,}005\, d$. Ferner sieht man leicht, dafs die Arbeit A, die verrichtet wird, wenn man am Ergographen den

Druck d hervorbringt, $A = v \cdot d/2$ sein wird. Setzt man hier den durch d ausgedrückten Wert von v ein, so erhält man folglich: $A = 0.0025\, d^2$, indem als Einheit der Arbeit das Centimeter-Kilo gebraucht wird, welche Einheit hier der 100 mal gröfseren Einheit, dem Meter-Kilogramm, vorzuziehen ist, weil man es hierdurch vermeidet, fortwährend Brüche zu schreiben. Aus dem gefundenen Ausdruck für die Arbeit folgt $d = 20 \cdot \sqrt{A}$. Legt man hier A successiv eine Reihe verschiedener Werte bei, so kann man aus der Gleichung die Drucke berechnen, die ausgeübt sein müssen, wenn gerade die betreffenden Arbeitsmengen geleistet sein sollen. Und aus der oben angeführten Skala für das Verhältnis zwischen den Drucken und der Gröfse der graphischen Exkursionen kann man darauf ferner die Exkursion berechnen, die jeder angegebenen Arbeitsmenge entspricht. Auf diese Weise kann man sich, wenn auch mit einigem Rechnen, eine Tabelle anfertigen, aus der man sieht, wie grofse Arbeit einer bestimmten Exkursion in den graphischen Aufzeichnungen entspricht. Diese Tabelle ist Pl. IX in der Form eines kleinen Mafsstabs wiedergegeben. Man kann den Mafsstab auf Glas ätzen oder auf ein Gelatineblättchen einritzen[1]; in dieser Form ist er leicht zu gebrauchen, da man nur nötig hat, ihn über das Ergogramm zu schieben, wo die Gröfse der einzelnen Exkursionen dann direkt in Centimeter-Kilo abzulesen ist. Verfährt man auf diese Weise, so wird die Ausmessung sogar eines gröfseren Versuchsmaterials keine unüberwindlichen Schwierigkeiten darbieten.

Da ich natürlich alle im Folgenden näher zu untersuchenden Ergogramme ausmessen mufste, wird es nicht allein nicht notwendig, sondern auch nicht zweckmäfsig sein, diese in der Form der Originalaufzeich-

[1] Ein Gelatineblättchen ist jedoch nicht geeignet, da es hygroskopisch ist und sich während des Gebrauches zwischen den Fingern krümmt. Ich stelle dergleichen spezielle Mafsstäbe auf die Weise her, dafs ich eine wagerecht gestellte Glasplatte mit einer 6 prozentigen Gelatineauflösung übergiefse. Nachdem letztere getrocknet ist, graviere ich den Mafsstab in die Gelatine ein und fülle die Linien mit Zinnober. Die roten Linien sind auf den schwarzen Kurventafeln deutlich zu sehen, und der Mafsstab wird nicht von der Feuchtigkeit der Luft beeinflufst und erhält sich jahrelang.

nungen wiederzugeben. Dergleichen Wiedergaben würden dem Leser, der sich veranlafst finden möchte, sie zu irgend einem Zwecke zu benutzen, die Arbeit nur erschweren. Ich zog es deshalb vor, die Ergogramme in schematischer Form zu geben, indem jeder einzelne Zug durch eine Linie abgebildet ist, deren Länge in Centimeter die Gröfse der verrichteten, in Centimeter-Kilo gemessenen Arbeit bezeichnet. Alle Pl. X u. f. abgebildeten Ergogramme sind auf diese Weise dargestellt. Hierdurch wird erstens der Gebrauch erleichtert, indem man mittels eines in Millimeter geteilten Mafsstabes im stande ist, die Gröfse der einzelnen Arbeiten in Zehnteln der Arbeitseinheit abzulesen. Ferner erhält man durch diese Wiedergabe ein weit richtigeres Bild von den Variationen der Arbeit, als die originalen Kurven zu geben vermögen. Denn, wie oben nachgewiesen, stellen letztere nicht die ausgeführten Arbeitsmengen, sondern nur die geübten Drucke dar, und diese Drucke sind nicht einmal durch der Gröfse der Drucke proportionale Linien angegeben. Die hier gewählte schematische Darstellung scheint mir deshalb einen grofsen Vorzug zu haben. Sie hat nur den einen Übelstand, dafs der Takt, in welchem die einzelnen Züge ausgeführt wurden, nicht direkt zu ersehen ist. Dies wäre zu erreichen gewesen, wenn man z. B. den Zwischenraum zwischen den einzelnen Linien dem Zeitraum zwischen den successiven Zügen proportional gemacht hätte. Hierdurch würden viele Ergogramme aber ganz übermäfsige Ausdehnung angenommen haben, wodurch der Überblick verloren gegangen wäre. Ich beschränkte mich deshalb darauf, den Takt durch Angabe der pr. Min. ausgeführten Züge anzuführen. Wo sich keine Angabe findet, war der Takt immer 40 Züge pr. Min.

Die nähere statistische Bearbeitung des Materials läfst sich hier nicht im allgemeinen besprechen, da sie sich natürlich nach den zu untersuchenden Verhältnissen richtet. Sie wird im Folgenden also der Gegenstand einer speziellen Behandlung werden.

DIE MUSKELARBEIT.

Die Abhängigkeit der Muskelarbeit vom Takte. Aus dem täglichen Leben ist es wohlbekannt, dafs es dem Organismus keineswegs gleichgültig ist, wie lange Zeit gebraucht wird, um eine gegebene körperliche Arbeit zu verrichten. Eine Arbeit, deren Leistung während einer Minute durchaus unerreichbar wäre, kann im Laufe einer Stunde sehr leicht zu verrichten sein, indem sie in eine Reihe Partialarbeiten mit dazwischenliegenden Ruhezeiten eingeteilt wird. Physiologisch betrachtet läfst die Arbeit sich nicht einfach durch das Produkt des zurückgelegten Weges und des Widerstands messen, denn sie ist auch eine Funktion der Zeit. Läfst man daher einen Muskel oder eine Muskelgruppe in regelmäfsigem Takt bis zu völliger Ermüdung arbeiten, so wird nicht in allen Fällen dieselbe Arbeit geliefert werden: je schneller der Takt ist, je kürzere Zeit zur Erholung zwischen den einzelnen Partialarbeiten gewährt wird, um so geringer mufs die totale Arbeitsleistung werden. Dies wird denn auch durch die myographischen und ergographischen Werke von Kronecker[1], Funke[2] und Maggiora[3] völlig bestätigt. Aus den von diesen Forschern angestellten genauen Messungen geht zugleich hervor, dafs es sich hier nicht um reine Kleinigkeiten handelt. Wird der Takt z. B. von 10 bis auf 4 Sekunden beschleunigt, also 5/2 mal so schnell gemacht, so kann die Arbeitsleistung in ungünstigen Fällen von 34,6 bis 1,1 Kilogrammmeter in der Stunde, also bis auf 1/32 sinken. Indes ist das Verhältnis nicht immer so ungünstig, da der Einflufs des Taktes mit der Gröfse der vom Muskel zu hebenden Last variiert; für jede gegebene Belastung wird es

---

[1] Über die Ermüdung und Erholung der quergestreiften Muskeln. Berichte der sächsischen Gesell. d. Wissenschaften. 1871.

[2] Über den Einflufs der Ermüdung auf den zeitlichen Verlauf der Muskelthätigkeit. Pflügers Archiv für Physiologie. Bd. 8.

[3] Les lois de la fatigue étudiées dans les muscles de l'homme. Arch. ital. de Biol. Bd. 13. Archiv für Anat. u. Physiol. Phys. Abt. 1890.

einen bestimmten Takt geben, nach welchem das Maximum der Arbeit verrichtet werden kann.

Wie wertvoll diese Untersuchungen nun auch sein mögen, ist hierdurch die Frage nach der Abhängigkeit der Arbeit von dem Takte doch nicht gänzlich aufgeklärt. Alle genannten Messungen wurden nämlich bei konstanter Belastung des Muskels angestellt. Hieraus folgt, dafs man nur über die Variationen der totalen Arbeitsleistung Aufschlüsse erhalten kann, während die Methode uns nichts darüber lehrt, in welchem Verhältnisse die successiven Partialarbeiten abnehmen. Denn diese Partialarbeiten, die einzelnen Züge, sind anfänglich alle gleichgrofs, weil jede einzelne derselben kleiner ist als das Maximum von Arbeit, das zu leisten der Muskel im stande ist. Erst wenn der Muskel bis zu einem gewissen Grade ermüdet ist, beginnen die einzelnen Züge an Stärke abzunehmen. Wünscht man also Aufschlüsse über die Abnahme der einzelnen Partialarbeiten, so mufs der Muskel bei jedem einzelnen Zuge das Maximum der Arbeit liefern, was nur durch einen Feder-Ergographen zu erreichen ist. Da derartige Untersuchungen bis jetzt nicht vorliegen, habe ich diese Frage zu besonderer Behandlung vornehmen müssen.

Die Versuchsanordnung, in allem Wesentlichen übrigens dieselbe, die bei den meisten der folgenden Versuche angewandt wurde, war nicht sehr kompliziert. Der Takt wurde mittels eines Metronoms angegeben, das auf 80 bis 8 Taktschläge pr. Minute eingestellt werden konnte. Wurde ausnahmsweise ein noch langsamerer Takt (6 pr. Min.) angewandt, so wurde derselbe vom Experimentator nach einer gewöhnlichen Taschenuhr angegeben. Der Experimentator hatte sonst weiter nichts zu thun, als den Kymographen in Gang zu setzen, wenn die V-P sich zum Anfangen bereit erklärte. Und für die V-P handelte es sich nur darum, den Takt innezuhalten und bei jedem einzelnen Zuge die möglichst grofse Muskelanspannung zu leisten. Die auf den Kymographen aufgezeichnete Kurve konnte sie nicht sehen; hierdurch war es ausgeschlossen, dafs sie vorsätzlich oder unvorsätzlich eine gewisse Regelmäfsigkeit der successiven Arbeiten hervorrief. Dagegen konnte

sie die eingeteilte Scheibe am Ergographen sehen, deren Maximumzeiger den gröſsten, von ihr geleisteten Zug markierte. Diese Ordnung erwies sich als ganz praktisch, weil man nun ein bestimmtes Ziel zu erstreben hatte. Der Maximumszug erschien als ein »Rekord«, den zu »schlagen« man immer bemüht sein muſste. Da die sowohl langweilige als anstrengende Muskelarbeit sich nicht wohl als ein Spiel betrachten lieſs, schadete es jedenfalls nichts, daſs sie zum Sport gemacht wurde. Wenigstens wurde hierdurch erreicht, daſs die V-P anfangs ihre Kräfte nicht schonte, um desto länger aushalten zu können, wozu namentlich die eine meiner Versuchspersonen stark geneigt war.

Eine wesentliche Schwierigkeit bei der Bestimmung des Einflusses des Taktes besteht darin, daſs sich leicht andre, störende Faktoren gleichzeitig geltend machen. Unter diesen ist die Ermüdung wohl die hervortretendste. Wollte man dieselbe V-P mit kurzen Zwischenräumen eine Reihe von Ergogrammen in verschiedenem Takte ausführen lassen, so würden die Kurven ein durchaus falsches Bild von dem Einflusse des Taktes geben. Denn die arbeitenden Muskeln würden immer mehr ermatten, so daſs nicht nur der Takt, sondern auch die vorhandene Ermüdung dazu beitragen würde, den verschiedenen Ergogrammen verschiedene Form zu geben. Soll der Einfluſs des Taktes rein hervortreten, so müssen die zu vergleichenden Ergogramme in demselben Stadium der Ermüdung ausgeführt sein. Dies kann man aber nur dann mit Sicherheit sagen, wenn vorher überhaupt keine Arbeit verrichtet worden ist, so daſs die Muskeln nach vollständiger Erholung ganz frisch sind. Um dies zu erreichen, wurde gewöhnlich nur ein Versuch des Tages gemacht: wenn an ganz einzelnen Tagen zwei Versuche angestellt wurden, trat zwischen den beiden Versuchen stets eine wenigstens zweistündige Pause mit völliger Ruhe ein. Ferner wurde bei fast allen meinen ergographischen Versuchen nur die linke Hand gebraucht, weil diese bei den Arbeiten des täglichen Lebens lange nicht so sehr in Aktivität ist wie die rechte Hand: hierdurch sicherte ich mir also, daſs die Hand sich während der Erholungspausen wirklich ausruhte.

Durch die genannte Ordnung der Versuche entsteht jedoch ein neuer Übelstand. Da eine längere Versuchsreihe über den Einfluſs des verschiedenen Taktes auf die Arbeit notwendigerweise über eine gröſsere Anzahl von Tagen verteilt werden muſs, so wird daher die immer mehr wachsende Übung sich geltend machen. Dieser Umstand hat glücklicherweise aber doch nicht viel zu bedeuten. Allerdings wächst die Gröſse der Arbeit, die unter gegebenen Verhältnissen geleistet werden kann, fortwährend mit der Übung, den gröſsten und eingreifendsten Einfluſs hat die Übung jedoch während der ersten Tage. Unterläſst man also nur, die während der ersten Tage ausgeführten Versuchsreihen mitzunehmen, so hat es nicht viel zu sagen, zu welchem späteren Zeitpunkte der einzelne Versuch angestellt wurde. Überdies kann man den Einfluſs der Übung bis zu einem gewissen Grade eliminieren, indem man die früher ausgeführten Versuche auf einer späteren Übungsstufe wiederholt, um zu sehen, ob in den gewonnenen Resultaten wesentliche Abweichung zum Vorschein kommt. Werden diese verschiedenen Vorsichtsmaſsregeln beachtet, so kann man darauf rechnen, daſs man einen genauen Ausdruck für den Einfluſs des Taktes auf die Arbeit zu erhalten vermag. Wir schreiten nun zur näheren Untersuchung der Resultate der angestellten Versuche.

Pl. X—XII sind eine Reihe Ergogramme wiedergegeben, alle von derselben V-P, A. L., ausgeführt; sie unterscheiden sich nur durch den verschiedenen Takt, in welchem die einzelnen Züge aufeinander folgten. Da, wie oben berührt, die gröſsere oder geringere Übung aber nicht ganz ohne Bedeutung ist, gebe ich hier zugleich das Datum jedes einzelnen Ergogramms an[1].

Pl. X, A. d. 7/2. 6 pr. Min. *Pl. X, B.* d. 8/2. 80 pr. Min. *Pl. X, C.* d. 7/2. 10 pr. Min. *Pl. XI, A.* d. 17/3. 20 pr. Min. *Pl. XI, B.* d. 21/2. 40 pr. Min. *Pl. XII, A.* d. 26/2. 30 pr. Min. *Pl. XII, B.* d. 7/2. 60 pr. Min. Die 7 genannten Ergogramme bieten, wie man sieht, eine ziemlich gleichmäſsige Variation des Taktes dar, von

---

[1] Alle meine ergographischen Messungen wurden im Laufe des Jahres 1900 ausgeführt.

6 bis 80 pr. Min. Bei näherer Betrachtung zeigt es sich, dafs sie in zwei Gruppen zerfallen, die sich durch die Form der Ergogramme voneinander unterscheiden. In der einen Gruppe konvergieren die Ergogramme gegen die Abscisse, während sie in der anderen Gruppe nahe daran sind, der Abscisse parallel zu verlaufen. Dafs das Ergogramm gegen die Abscisse konvergiert, will offenbar weiter nichts heifsen, als dafs die successiven Partialarbeiten immer kleiner werden, so dafs die Arbeit zuletzt ganz ins Stocken gerät. Dies zeigt sich denn auch in der Praxis, bei der Leistung der Arbeit; die V-P hört auf, weil sie überhaupt nicht im stande ist, fortzusetzen. Ganz anders verhält es sich in der anderen Gruppe, wo das Ergogramm fast parallel zur Abscissenlinie verläuft. Hier nähern die Partialarbeiten sich also einer konstanten Gröfse, was mit anderen Worten heifsen will, dafs die Arbeit, dem Anschein nach, bis ins unbegrenzte fortgesetzt werden kann. Buchstäblich darf man dies natürlich nicht nehmen, innerhalb einer passenden Zeit wird die V-P aber im stande sein, fortzufahren, ohne dafs die Partialarbeiten bedeutende Verminderung zeigen. Bei allen diesen Ergogrammen geschah der Abschlufs nun auch nicht damit, dafs die V-P die »Arbeit einstellte«; die Initiative wurde in allen Fällen vom Experimentator genommen, der die verrichtete Arbeit für genügend erklärte. Wäre es der V-P gestattet worden, fortzusetzen, so wären die Ergogramme ohne Zweifel vielmal länger geworden. Den wesentlichsten Unterschied zwischen den beiden Gruppen können wir dadurch ausdrücken, dafs wir letztere die »unbegrenzten« Ergogramme nennen als Gegenteil der ersteren Gruppe, der »begrenzten« Ergogramme.

Aus Pl. X—XII geht nun ferner hervor, dafs die gröfsere oder geringere Geschwindigkeit des Taktes entscheidet, ob ein Ergogramm begrenzt oder unbegrenzt wird. Fangen wir mit dem langsamsten Takt, 6 pr. Min., an, so zeigt Pl. X, A, dafs die Ordinaten fast gar nicht an Gröfse abnehmen, oder mit anderen Worten: die successiven Partialarbeiten sind annähernd gleichgrofs. Beim Takte 10 pr. Min. findet sich aber schon eine deutliche, wenn auch langsame Verminderung der Ordinaten (Pl. X, C), und bei 20 pr. Min. ist die Senkung

im Anfang des Ergogramms stark hervortretend (Pl. XI, A). Der absoluten Höhe der Ordinaten, namentlich im Anfange der Ergogramme, darf kein Gewicht beigelegt werden, da dieselbe, wie wir später sehen werden, vorzüglich von der Übung abhängig ist; da Pl. XI, A 6 Wochen später als die Kurven Pl. X ausgeführt wurde, genügt dieser Umstand, um zu erklären, weshalb ersteres Ergogramm mit viel gröſseren Ordinaten anfängt als letztere. Die absolute Höhe der Ordinaten kann jedoch für die Form der Ergogramme keine wesentliche Bedeutung haben, und wir können deshalb davon absehen, daſs die Kurven auf verschiedenen Übungsstufen ausgeführt wurden. Gehen wir nun zu einem schnelleren Takt, so sehen wir, daſs 30 pr. Min. (Pl. XII, A) noch ein unbegrenztes Ergogramm geben, 40 pr. Min. (Pl. XI, B) dagegen das erste begrenzte; solche werden nun auch alle folgenden, mit 60 und 80 Zügen pr. Min. ausgeführten.

Einen jähen Übergang kann es der Natur der Sache zufolge zwischen den begrenzten und den unbegrenzten Ergogrammen nicht geben. Bei einem gewissen Takte, der für die hier untersuchte V-P zwischen 30 und 40 pr. Min. liegen muſs, wird man freilich finden, daſs kleine, zufällige Umstände entscheidenden Einfluſs darauf bekommen, ob das Ergogramm die eine oder die andre Form erhält. Bei diesem Takt wird ein Ergogramm z. B. im Anfange der Versuche begrenzt sein, während es nach einiger Übung in ein unbegrenztes übergeht. Von einem solchen Übergang aus einer in die andre Form habe ich für diese V-P kein Beispiel, man braucht übrigens aber nur den Einfluſs der Übung auf ein begrenztes Ergogramm zu betrachten, um sich zu überzeugen, daſs dessen Übergang in die unbegrenzte Form nicht ganz undenkbar ist. Vergleicht man z. B. Pl. XI, B., das d. $^{21}/_{2}$ ausgeführt wurde, mit Pl. XIII, C, das d. $^{31}/_{4}$, ebenfalls mit 40 pr. Min. genommen wurde, so sieht man, wie das Ergogramm nicht nur an Höhe, sondern auch an Ausdehnung so stark gewachsen ist, daſs nicht viel dazu gehört, es unbegrenzt zu machen. Die kleine Strecke der Kurve, die Pl. XIII, C unten rechts über der Hauptkurve abgesetzt ist, gibt die unmittelbare Fortsetzung der letzteren; wird diese Strecke

mitgerechnet, so sieht man, dafs die Kurve stark tendiert, zur Abscissenachse parallel zu werden. Für eine gegebene V-P ist der Takt, bei welchem der Übergang aus dem begrenzten in das unbegrenzte Ergogramm stattfindet, augenscheinlich also keine konstante Gröfse; er verändert sich durch Übung, wenigstens innerhalb gewisser Grenzen. Wir werden uns auf dieses Verhältnis näher einlassen, wenn wir später die Bedeutung der Übung speziell untersuchen.

Als eine interessante Thatsache, die mit dem Gesagten durchaus übereinstimmt, ist anzuführen, dafs nicht einmal beide Hände derselben V-P sich auf gleiche Weise zu verhalten brauchen. Jeder, der nicht linkisch ist, wird gewöhnlich seine rechte Hand zu bedeutend stärkerer Entwickelung gebracht haben als die linke. Obschon nun bei meinen ergographischen Versuchen die rechte Hand fast niemals gebraucht wurde, weshalb sie also für derartige Arbeit auch nicht besonders trainiert war, zeigte es sich dennoch, dafs sie ein unbegrenztes Ergogramm bei einem Takte gab, bei dem die linke Hand trotz aller Übung nur ein begrenztes lieferte. Dies geht aus *Pl. XIV, A* hervor. Dieses Ergogramm wurde d. $^{31}/_{4}$ von A. L. mit der rechten Hand ausgeführt, also an demselben Tage wie Pl. XIII, C, und der Takt ist derselbe für beide Kurven, 40 pr. Min. Das mit der rechten Hand ausgeführte Ergogramm ist augenscheinlich unbegrenzt: während einer längeren Strecke — die kleine Strecke oben rechts ist die unmittelbare Fortsetzung der Hauptkurve — haben die Partialarbeiten annähernd konstante Gröfse, und die Arbeit hätte thatsächlich noch lange fortgesetzt werden können. Hieraus folgt offenbar, dafs es auch in hohem Grade individuell verschieden werden mufs, bei welchem Takte der Übergang aus den begrenzten in die unbegrenzten Ergogramme stattfindet. So gab eine einzelne meiner Versuchspersonen, Dr. B., konstant unbegrenzte Ergogramme mit der linken Hand beim Takte 40 pr. Min.; erst bei 60 pr. Min. stockte die Arbeit von selbst. Zur näheren Erhellung der Sache sind drei Ergogramme wiedergegeben:

Pl. XIV, B, d. $^{26}/_{2}$. 60 pr. Min. *Pl. XV, A,* d. $^{21}/_{2}$. 40 pr. Min.
Pl. XV, B, d. $^{17}/_{3}$. 20 pr. Min.

Da diese Kurven, wie aus der Datierung hervorgeht, auch etwas verschiedene Übungsstufen repräsentieren, kann den absoluten Höhen der Ordinaten kein Gewicht beigelegt werden. Die Kurve XIV, B (60 pr. Min.) befindet sich hier gerade am Übergange zwischen den begrenzten und den unbegrenzten; es gelang dieser V-P zuletzt wirklich, als ihre Einübung den Gipfel erreicht hatte, sogar bei diesem schnellen Takte die Arbeit unbegrenzt zu erhalten. Während des Übergangs zeigten sich häufig höchst eigentümliche Schwankungen der Kurven, und diese haben zweifelsohne so grofses theoretisches Interesse, dafs sie ein eingehenderes, spezielles Studium verdienen. Da es uns hier jedoch zu weit führen würde, wollten wir dergleichen Details verfolgen, beschränke ich mich darauf, die Aufmerksamkeit auf diese Verhältnisse zu lenken.

Die Resultate unserer vorhergehenden Untersuchungen lassen sich nun in folgenden Sätzen zusammenfassen:

Bei langsamem Takte, also bei grofsen Zeiträumen zwischen den einzelnen Partialarbeiten, vermindert sich die Gröfse der letzteren verhältnismäfsig wenig und nähert sie sich einem konstanten Werte, der um so gröfser ist, je langsamer der Takt wird; wenn die Gröfse der successiven Partialarbeiten auf diese Weise konstant wird, sind die Ergogramme unbegrenzt. Bei hinlänglich schnellem Takte nähern die Partialarbeiten sich dagegen an Null, und folglich werden die Ergogramme begrenzt. Der Takt, bei welchem der Übergang zwischen den beiden Formen stattfindet, ist individuell verschieden, kann sogar für die rechte und die linke Hand desselben Individuums verschieden sein, und ist übrigens nur innerhalb eines kürzeren Zeitraums konstant, da er sich bei fortschreitender Übung verändert.

Über die Ursache von dem Einflusse des Taktes auf die Form der Ergogramme scheint wohl kein Zweifel herrschen zu können. Alle vorliegenden Umstände deuten darauf hin, dafs der mehr oder weniger voll-

ständige Stoffwechsel die durch den Takt hervorgebrachte Verschiedenheit der Form der Ergogramme bedingt. Genau auseinanderzulegen, was im arbeitenden Muskel vorgeht, vermag man allerdings noch nicht, das Wenige aber, das wir wissen, scheint zu genügen, um die oben nachgewiesenen Verhältnisse zu erklären. Da mechanische Arbeit, Muskelarbeit, nur mit Aufwand andrer Energieformen zu erhalten ist, mufs also im arbeitenden Muskel fortwährender Stoffverbrauch stattfinden. Der Stoffwechsel hat nun die Aufgabe, teils die verbrauchten Stoffe zu entfernen, teils neue zuzuführen, durch deren Dekomposition chemische Energie sich in mechanische umsetzen läfst. Je vollständiger dies stattfindet, um so mehr werden die successiven Arbeitsleistungen des Muskels sich unverändert erhalten. Es ist ferner einleuchtend, dafs je schneller der Takt ist, in welchem gearbeitet wird, der Verbrauch während gegebener Zeit um so gröfser wird, und der Stoffwechsel um so weniger im stande ist, den Verbrauch zu ersetzen. Es ist daher leicht verständlich, dafs die Höhe der Partialarbeiten um so geschwinder abnehmen mufs, je schneller der Takt ist, was mit den Ergebnissen der Versuche auch ganz übereinstimmt. Näher können wir uns hier nicht auf die Sache einlassen; später, wenn wir für die Gröfse der Arbeit einen mathematischen Ausdruck gefunden haben werden, wird der gesetzmäfsige Einflufs des Taktes, mithin des Stoffwechsels, auf die Arbeitsleistung eingehender nachgewiesen werden.

Es gibt indes noch einen Punkt, den wir uns schon hier verständlich zu machen suchen müssen, nämlich die Ursache von der Entstehung der begrenzten Ergogramme. Scheinbar widerstreitet die Existenz dieser Kurven dem geradezu, was oben über den Einflufs des Stoffwechsels auf die Muskelarbeit gesagt wurde. Denn wie schnell auch gearbeitet wird, so mufs der Stoffwechsel doch immer einigen Ersatz des verbrauchten Stoffes bringen, und die Muskelkraft wird also nicht völlig erschöpft. Selbst wenn die Partialarbeiten bei schnellem Takte schliefslich sehr klein werden, gibt es anscheinend doch keinen Grund, weshalb sie Null werden sollten, so dafs die Arbeit völlig ins Stocken ge-

riete, was doch thatsächlich der Fall ist. Nur als Resultat des Verhältnisses zwischen Verbrauch und Zufuhr scheinen die begrenzten Ergogramme sich also nicht erklären zu lassen. Ohne Zweifel müssen noch andre Ursachen mitwirken, was die Erfahrung auch bestätigt. Wenn ein begrenztes Ergogramm entsteht, wird es stets von einer psychischen Erscheinung begleitet, die bei den unbegrenzten, wenigstens nach meiner Erfahrung, nie vorkommt, nämlich von einer schmerzhaften Empfindung der Ermüdung. Und durch Selbstbeobachtung überzeugt man sich leicht, daſs dieser Schmerz auf die Anstrengung direkt hemmend wirkt; während des anwachsenden Schmerzes vermag man den Muskel nicht so stark wie vorher anzuspannen. Vieles spricht nun wirklich dafür, daſs der subjektiv wahrgenommenen Verminderung der Anspannung eine Hemmung der zentralen Innervation entspricht. Kraepelin kam schon früher, auf Grundlage seiner ergographischen Untersuchungen, zu dem Ergebnisse, daſs das Aufhören der Muskelarbeit bei wachsender Ermüdung sich ohne die Annahme einer solchen zentralen Hemmung kaum erklären lasse[1]. Bei der vollständigen mathematischen Behandlung des Problems, die im Folgenden durchgeführt werden wird, wird es sich zeigen, wie das begrenzte Ergogramm sich dadurch von dem unbegrenzten unterscheidet, daſs von einem gewissen Zeitpunkte an eine Kraft wirkt, die jede folgende Partialarbeit um eine konstante Gröſse erniedrigt. Und dieser Zeitpunkt trifft gerade mit dem Moment zusammen, da die Selbstbeobachtung das Auftauchen der schmerzhaften Ermüdung konstatiert. Endlich erweist es sich auch, daſs jeder andere körperliche Schmerz eine entsprechende Verminderung der Muskelarbeit zur Folge hat. Alle diese Thatsachen, die wir später ausführlich erörtern werden, lassen sich kaum anders deuten als durch die Annahme, daſs jeder vorherrschende unlustbetonte Bewuſstseinszustand die zentrale Innervation hemmt. Diese in gewissen Fällen eintretende Hemmung bewirkt,

---

[1] Hoch u. Kraepelin: »Über die Wirkung der Theebestandteile auf geistige und körperliche Arbeit«, in Kraepelin: Psychologische Arbeiten. I. S. 477.

dafs die Ergogramme begrenzt werden. — So wie ich diese Erklärung hier darstellen konnte, beruht sie natürlich nur auf einer Reihe von Postulaten; allmählich, wie unsere Untersuchungen fortschreiten, werden erst die Beweise für deren Richtigkeit geliefert werden. Ich glaubte, sie aber schon hier andeuten zu müssen, um zu zeigen, dafs die Verschiedenheit der begrenzten Ergogramme von den unbegrenzten uns doch nicht ganz unverständlich ist.

Bevor wir nun zur mathematischen Behandlung der ergographischen Untersuchungen schreiten, werde ich in Kürze ein einzelnes Experiment besprechen, mittels dessen die Bedeutung des Stoffwechsels für die Muskelarbeit sich leicht nachweisen läfst. Der Versuch ist wohlbekannt und sowohl bei den myographischen als den ergographischen Untersuchungen in grofsem Umfang variiert worden. Es ist deshalb nicht nötig, uns näher auf denselben einzulassen, da seine Resultate uns aber bei der mathematischen Behandlung des Problems zu statten kommen werden, verdient er kurze Erwähnung.

Wenn der Stoffwechsel in den arbeitenden Muskeln für die Gröfse der geleisteten Arbeit Bedeutung hat, so mufs man im stande sein, durch Hemmung oder Förderung des Blutumlaufs die Ergogramme innerhalb gewisser Grenzen verkürzen oder verlängern zu können. Eine Hemmung des Blutumlaufs ist jedenfalls nicht schwer zu bewerkstelligen. Legt man ein breites, ein wenig elastisches Band straff um den Arm dicht oberhalb des Ellbogens, so wird der Blutzuflufs nach dem Unterarm und der Hand zwar nicht völlig gehemmt, aber doch stark vermindert werden. Hiervon mufs die Folge sein, dafs die Ergogramme bedeutend verkürzt werden. Löst man hierauf das Band in dem Augenblicke, da die Arbeit stockt, so mufs es sich zeigen, dafs bei dem vermehrten Blutzuflusse die Arbeit sogleich wieder beginnen kann. Die Erfahrung bestätigt vollständig die Richtigkeit hiervon, wie aus folgenden drei Kurven hervorgeht:

Pl. XII, C. d. $^{8}/_{2}$. A. L. rechte Hand. *Pl. XIII, A.* d. $^{12}/_{2}$. A. L. linke Hand. *Pl. XIII, B.* d. $^{13}/_{2}$. Fnn. linke Hand.

Die drei Versuche wurden genau auf die beschriebene Weise angestellt. Sobald die V-P nicht mehr mit dem umbundenen Arme arbeiten konnte, wurde vom Experimentator das Band gelöst, worauf die V-P sofort wieder zu arbeiten anfing. Mehr als 3—4 Sekunden verliefen wohl kaum zwischen den beiden Teilen der Kurven. Nach Lösung des Bandes wurde die Arbeit nur so lange fortgesetzt, bis der Einfluſs des lebhafteren Blutumlaufes unzweifelhaft war. Der Takt, in welchem diese drei Kurven ausgeführt wurden, war 60 pr. Min.; wenn ich ihn auf den Planen als ∞ pr. Min. bezeichnet habe, ist dies natürlich eine rein nominelle Gröſse, wodurch ich nur auszudrücken beabsichtigte, daſs die Wirkung im Verhältnisse zum Stoffwechsel fast dieselbe war, als wenn die Arbeit mit unendlicher Geschwindigkeit ausgeführt worden wäre. Die drei Ergogramme zeigen in der That auch, wie zu erwarten stand, daſs die Partialarbeiten schneller auf Null hin abnehmen, als bei irgend einem anderen Takte.

Wir wollen jetzt einen mathematischen Ausdruck für die Gröſse der verrichteten Arbeit suchen. Da die Ergogramme, wie man sieht, keine regelmäſsigen geometrischen Kurven sind, sondern zahlreiche Schwankungen, die Wirkungen mehrerer unbekannten, störenden Faktoren, darbieten, müssen diese Unregelmäſsigkeiten natürlich eliminiert werden. Dies ist nun auch mit keiner gröſseren Schwierigkeit verbunden; statt mit der Gröſse der einzelnen Partialarbeiten zu rechnen, braucht man nur mit dem mittleren Werte einer hinlänglich groſsen Anzahl derselben zu rechnen. Die Aufgabe selbst läſst sich auf verschiedene Weise angreifen; ich versuchte auf verschiedenen Wegen, die wahrscheinlich sämtlich ans erwünschte Ziel führen können, vorwärts zu kommen. Am leichtesten scheint es mir indes, das Problem folgendermaſsen zu formulieren: Wenn die Arbeit mit konstanter Differenz wächst, wie wächst dann die Anzahl der Partialarbeiten? Um zur Beantwortung dieser Frage zu kommen, braucht man nur die Gröſsen einer Reihe successiver Partialarbeiten zu addieren, bis die Summe einen konstanten, willkürlich gewählten Wert erhält, worauf man einen mathematischen Ausdruck für dasjenige Verhältnis

findet, in welchem die entsprechenden Anzahlen von Partialarbeiten wachsen.

Um diese Aufgabe lösen zu können, müssen wir zuvörderst für den konstanten Zuwachs der Arbeit eine passende Gröfse wählen. Diese darf nicht zu klein gewählt werden, da wir dann die zufälligen Unregelmäfsigkeiten nicht eliminiert bekommen; wird sie aber zu grofs genommen, so erhalten wir zu wenig Zahlen zum Operieren. Da die Gröfse der einzelnen Partialarbeiten äufserst selten, und nur im Anfang der Ergogramme, 5 Centimeter-Kilogramm übersteigt, und da man, wenn die Unregelmäfsigkeiten ausgeglichen werden sollen, wohl kaum weniger als 4 Partialarbeiten addieren darf, wählte ich diese Gröfse $4 \cdot 5 = 20$ cm-K. zur konstanten Arbeitsdifferenz. Ich addiere also die Gröfse so vieler successiven Partialarbeiten, dafs die Summe 20 cm-K. möglichst nahe kommt, und notiere die entsprechende Anzahl Partialarbeiten. Selbstverständlich ist es unmöglich, jede einzelne Summe genau 20 cm-K. grofs zu machen, das hat aber auch nicht viel zu bedeuten, erstens, weil unseren Ergogrammen zufällige Fehler anhaften, und ferner, weil die erwähnte Berechnung nur dazu dienen soll, uns einen Überblick über das wahrscheinliche Verhältnis zwischen der Gröfse der Arbeit und der Anzahl der Partialarbeiten zu verschaffen. Bei der Ausführung der genannten Additionen ist es offenbar ziemlich gleichgültig, von welchem Ende des Ergogramms man beginnt; man kann ebenso gut mit den gröfsten als mit den kleinsten Partialarbeiten anfangen. Ich zog indes letzteres vor, und zwar aus folgendem Grunde. Der Natur der Sache zufolge ist es ein reiner Zufall, ob die ganze Summe der in einem Ergogramm aufgezeichneten Arbeit gerade ein Multiplum von 20 cm-K. ist. Es wird also, wenn man das Ergogramm in Summen von dieser Gröfse einteilt, gewöhnlich ein Rest übrigbleiben, der bei der Berechnung nicht mitgenommen wird. Fängt man nun die Addition mit den gröfsten Partialarbeiten an, so kann eine sehr grofse Anzahl derselben übrigbleiben, die nicht die Summe von 20 cm-K. ergeben. Beginnt man dagegen von unten, mit den kleinsten Partialarbeiten, so können höchstens 3 oder 4 der gröfseren übrigbleiben, deren

Summe nicht 20 cm-K. erreicht. Es ist deshalb unbedingt am zweckmäfsigsten, die Addition mit den kleinsten zu beginnen.

In den Tab. 21 und 22 sind nun die Resultate der hinsichtlich aller einzelnen Ergogramme der Plane X, XI, XII und XIII, A & B durchgeführten Berechnungen wiedergegeben. Die beiden Tabellen fallen in 10 Abschnitte, den 10 ausgemessenen Ergogrammen entsprechend. Über jedem einzelnen Abschnitt ist die Art des betreffenden Ergogrammes und dessen Platz in den Planen angegeben. Übrigens zerfällt jeder Abschnitt in vier Kolonnen. Unter der Überschrift A ist die Gröfse der verrichteten Arbeit angeführt, unter R diejenige Anzahl Partialarbeiten, die verrichtet werden mufsten, um die

(Siehe Tab. 21 und 22 S. 148 und 149.)

unter A gegebenen Arbeitsgröfsen zu erreichen. Ferner sind unter $\triangle A$ die Differenzen zwischen den einzelnen Werten von A angeführt. Man sieht, dafs diese Differenzen beinahe gleichgrofs sind und um das Mittel 20 cm-K. schwanken; diese Differenz mit gröfserer Annäherung innezuhalten war nicht möglich. Die in den Kolonnen A angeführten Zahlen bilden also überall annähernd arithmetische Reihen, und es ist folglich unsere Aufgabe, zu untersuchen, ob sich für die Art und Weise, wie die entsprechenden Werte von R, der Anzahl der Partialarbeiten, anwachsen, ein Gesetz finden läfst. Es liegt ja verhältnismäfsig nahe, zu untersuchen, ob diese Gröfsen nicht möglicherweise eine geometrische Reihe bildeten. Zu diesem Zwecke bilden wir die Quotienten R/r, indem wir jeden Wert von R mit dem in der Reihe zunächst vorausgehenden dividieren; diese Quotienten sind unter der Überschrift R/r angeführt. Eine nähere Betrachtung der Quotienten zeigt nun, dafs diese annähernd konstant sind; ihr gröfster Wert übersteigt nur ausnahmsweise 2,0, und mehr oder weniger nähern sie sich 1,0. Vergleicht man diese Quotienten mit den entsprechenden, die für die Unterschiedsempfindlichkeit auf verschiedenen Sinnesgebieten gefunden wurden (siehe Tab. 13 und 16), so sieht man, dafs R/r überall innerhalb derselben Grenzen liegt. Mit derselben Annäherung, mit der das Webersche Gesetz

Tab. 21.

6 pr. Min. Pl. X, A				10 pr. Min. Pl. X, C				20 pr. Min. Pl. XI, A				30 pr. Min. Pl. XII, A.				40 pr. Min. Pl. XI, B			
A	$\triangle A$	R	$\frac{R}{r}$	A	$\triangle A$	R	$\frac{R}{r}$	A	$\triangle A$	R	$\frac{R}{r}$	A	$\triangle A$	R	$\frac{R}{r}$	A	$\triangle A$	R	$\frac{R}{r}$
34,8		7		27,0		7		19,5		3		39,1		7		21,4		4	
56,5	21,7	12	1,714	45,2	18,2	12	1,714	37,0	17,5	6	2,000	59,4	20,3	11	1,571	39,9	18,5	8	2,000
77,0	20,5	17	417	63,9	18,7	17	417	56,9	19,9	10	1,667	78,5	19,1	15	363	60,5	20,6	13	1,625
96,9	19,9	22	294	82,5	18,6	22	294	76,0	19,1	14	400	100,4	21,9	20	334	78,8	18,3	18	385
116,7	19,8	27	227	103,9	21,4	28	273	96,9	20,9	19	357	119,4	19,0	25	250	98,5	19,7	24	333
137,2	20,5	32	185	124,0	20,1	34	214	117,1	20,2	24	263	138,0	18,6	30	200	117,2	18,7	30	250
157,9	20,7	37	156	144,5	20,5	40	177	136,8	19,7	29	209	159,6	21,6	36	200	136,9	19,7	37	233
178,1	20,2	42	135	163,4	18,9	45	115	158,4	21,6	35	208	178,8	19,2	42	167	156,9	20,0	45	216
196,9	18,8	47	119	184,2	20,8	51	133	177,3	18,9	40	143	200,6	21,8	49	167	176,2	19,3	54	200
215,2	18,3	52	107	206,0	21,8	57	118	198,0	20,7	46	150	221,7	21,1	56	143	195,4	19,2	65	204
234,3	19,1	57	096	227,2	21,2	63	105	218,8	20,8	52	130	242,1	20,4	64	143	215,8	20,4	80	231
254,1	19,8	62	1,088	246,3	19,1	69	095	239,0	20,2	58	115	261,0	18,9	72	125	235,2	19,4	98	225
				265,5	19,2	75	087	258,1	19,1	64	104	282,0	21,0	83	153	255,1	19,9	124	1,265
				286,3	20,8	82	093	278,7	20,6	71	109	302,7	20,7	95	145				
				307,3	21,0	89	085	297,5	18,8	78	099	322,1	20,4	107	126				
				326,6	19,3	95	067	317,5	20,0	86	103	342,4	20,3	119	112				
				346,3	19,7	102	074	338,1	20,6	94	093	363,2	20,8	131	101				
				367,7	21,4	110	080	358,9	20,8	102	085	384,0	20,8	144	100				
				388,8	21,1	118	1,073	377,7	18,8	109	068	404,6	20,6	158	097				
								396,5	18,8	116	064	425,1	20,5	173	1,095				
								416,9	20,4	124	069								
								436,6	19,7	132	065								
								457,9	21,3	141	068								
								477,4	19,5	150	064								
								497,5	20,1	158	053								
								517,8	20,3	166	051								
								537,1	19,3	174	1,048								

Tab. 22.

60 pr. Min. Pl. XII, B				80 pr. Min. Pl. X, B				∞. A. L. h. Pl. XII, C				∞. A. L. v. Pl. XIII, A				∞. Fnn. Pl. XIII, B			
A	$\triangle A$	R	$\frac{R}{r}$	A	$\triangle A$	R	$\frac{R}{r}$	A	$\triangle A$	R	$\frac{R}{r}$	A	$\triangle A$	R	$\frac{R}{r}$	A	$\triangle A$	R	$\frac{R}{r}$
36,3		8		19,7		5		34,2		8		23,1		5		27,4		8	
57,4	21,1	14	1,750	40,3	20,6	11	2,200	55,9	21,7	14	1,750	42,5	19,4	10	2,000	46,9	19,5	16	2,000
77,3	19,9	20	429	61,3	21,0	18	1,636	76,3	20,4	20	430	63,3	20,8	16	1,600	66,9	20,0	27	1,700
97,4	20,1	27	350	82,3	21,0	26	444	97,3	21,0	28	400	84,8	21,5	23	438	87,3	20,4	47	1,740
118,2	20,8	35	296	102,6	20,3	35	346	118,6	21,3	39	393	104,0	19,2	31	348				
137,0	18,8	44	257	122,3	19,7	46	314	139,0	20,4	58	1,487	124,3	20,3	46	1,484				
157,3	20,3	57	296	142,7	20,4	61	326												
176,9	19,6	73	1,281	162,9	20,2	91	1,492												

als für die Abhängigkeit der Empfindung vom Reize gültig betrachtet werden kann, findet man also auch das Gesetz für die Abhängigkeit der Muskelarbeit von der Anzahl der Partialarbeiten gültig. Sofern man es mit der Genauigkeit nicht gar zu streng nimmt, kann man daher sagen: wenn die Gröfse der Muskelarbeit in arithmetischer Progression wächst, so wächst die entsprechende Anzahl der Partialarbeiten in geometrischer Progression.

Die genannte Gesetzmäfsigkeit ist jedoch, wie gesagt, keineswegs eine genaue. Es kann natürlich nicht die Rede davon sein, hierbei stehen zu bleiben, und wie wir sogleich sehen werden, wird es auch nicht schwer fallen, für die Abhängigkeit des A von R eine erschöpfende Formel zu finden. Es ist indes von vornherein einzusehen, dafs der vollständige mathematische Ausdruck ziemlich kompliziert werden mufs, weshalb es jedenfalls sein Interesse hat, dafs man in Fällen, wo es nicht auf grofse Genauigkeit ankommt, den genannten annähernden Ausdruck gebrauchen kann. Hierzu kommt noch, dafs man dem Gesetze eine Formulierung geben kann, die demselben gewisse praktische Bedeutung gewährt. Wenn nämlich die Verrichtung einer Arbeit von bestimmter Gröfse in einem Falle eine gewisse Anzahl Partialarbeiten erfordert, in anderen Fällen aber unter ganz unveränderten äufseren Verhältnissen z. B. die doppelte oder dreifache Anzahl, so wird man die Anzahl der erforderlichen Partialarbeiten offenbar als Mafs für die Ermüdung des Muskels benutzen können. Die Ermüdung ist die Ursache, weshalb durch jede einzelne maximale Anspannung nicht dieselbe Arbeitsleistung erreicht wird; folglich mufs die Ermüdung um so gröfser sein, je mehr maximale Anspannungen nötig sind, um dieselbe Arbeitsmenge zu liefern. Es ist mithin berechtigt, diejenige Anzahl maximaler Anspannungen (Partialarbeiten), die in jedem einzelnen Falle zu einer bestimmten Arbeitsleistung erforderlich ist, als Mafs für die Ermüdung des Muskels zu gebrauchen. Wir können also jetzt das Gesetz so formulieren:

Wenn die Gröfse der Muskelarbeit in arithmetischer Progression wächst, so

wächst die Ermüdung des Muskels annäherungsweise in geometrischer Progression.

Es ist freilich nicht sehr ermunternd, dafs es sich somit zeigt, wie die Ermüdung viel stärker wächst als die Menge der geleisteten Arbeit; man hüte sich aber, hieraus gar zu weit führende philanthropische Konklusionen zu ziehen. Denn es ist zu bedenken, dafs das Gesetz erstens nur annäherungsweise gültig ist, und ferner nur unter der bestimmten Bedingung, dafs die arbeitenden Muskeln bei jeder einzelnen Kontraktion maximal angespannt werden. Dies kommt im täglichen Leben aber fast niemals vor, weil jedermann, der mit körperlicher Arbeit zu thun hat, aus Erfahrung weifs, dafs man viel besser aushält und mithin auf die Dauer viel mehr Arbeit liefert, wenn man die Kräfte schont. Es wird keinem Maurergehilfen, der den Gesellen Steine bringt, der Einfall kommen, jedes einzelne Mal die möglichst grofse Last zu nehmen, die er überhaupt zu tragen vermag. Thäte er das, so würde — unserem Gesetze zufolge — die Ermüdung in geometrischer Progression fortschreiten, und er würde im Laufe eines Arbeitstages gar zu wenig Arbeit liefern. Deshalb nimmt er anfangs, während die Kräfte frisch sind, keine gröfsere Last, als solche, die ihm gestattet, bis zum Schlusse mit ungefähr demselben Gewicht auszuhalten; für dergleichen Verhältnisse ist das Gesetz aber durchaus nicht gültig. Dagegen erhält dasselbe z. B. bei Sportleistungen Bedeutung, wo kurze Zeit hindurch mit maximaler Anspannung gearbeitet wird; die reifsende Geschwindigkeit, mit welcher die Ermüdung unter solchen Verhältnissen der Erfahrung gemäfs zunimmt, ist mit dem Gesetze durchaus in Übereinstimmung.

Interessant ist es übrigens, dafs ein ähnliches Gesetz für intensive geistige Arbeit gültig zu sein scheint. Friedrichs Experimente mit Schulkindern[1] haben gezeigt, dafs die Ermüdung der Kinder, die durch die Anzahl der in Probeaufgaben gleichartiger Natur be-

---

[1] Untersuchungen über die Einflüsse der Arbeitsdauer u. s. w. auf die geistige Leistungsfähigkeit der Schulkinder. Zeitschr. f. Psych. Bd. 13.

gangenen Fehler gemessen wurde, als geometrische Reihe anwächst, wenn die Arbeitszeit als arithmetische Reihe wächst. So erhielt man in einer Versuchsreihe 47 Fehler vor Anfang der 1 Stunde, nach Schlusse der 1. Stunde 70 Fehler; am Schlusse der 2. Stunde 158 und am Schlusse der 3. Stunde 183 Fehler. Diese Zahlen wachsen annähernd mit dem Quotienten 7/4; nur wird die letzte Anzahl der Fehler gar zu klein. Dies läfst sich jedoch ohne Schwierigkeit erklären, denn wenn man Kinder auf so widernatürliche Weise zu dreistündigem, durch keine Pause unterbrochenem Arbeiten zwingt, werden sie sich zuletzt zweifellos im Halbschlummer befinden. Da infolgedessen während der letzten Stunde wohl kaum mit derselben Kraft gearbeitet wurde wie während der ersten Stunden, wird die Ermüdung auch nicht in demselben Verhältnisse fortschreiten. Weil diese Fehlerquelle und wahrscheinlich noch viele andre auf die Resultate influieren müssen, kann man auch nicht erwarten, in den gefundenen Zahlen mehr als eine Andeutung des Gesetzes zu erblicken.

Wir kehren nun zur Muskelarbeit zurück, um wo möglich ein genaueres Gesetz als das genannte logarithmische Abhängigkeitsverhältnis zwischen der Gröfse der Arbeit und der Anzahl der Partialarbeiten zu finden. Um nun vorerst einen besseren Überblick über die Variation der Quotienten R/r zu erhalten, stellen wir dieselben graphisch dar. Dies ist Pl. III gezeigt. Als Abscisse wurde hier R abgesetzt, als Ordinate der entsprechende Wert R/r für 8 der in den Tab. 21 und 22 angegebenen Ergogramme. Nur die beiden ersten, mit dem Takte 6 und 10 p. Min., sind weggelassen, weil die Zahlen für diese Ergogramme so nahe an die des dritten, mit dem Takte 20 pr. Min., fallen, dafs die Kurven in der Zeichnung zusammenlaufen würden. Es genügt daher, nur eine derselben aufzuzeichnen, und da die dritte die vollständigste ist, wählte ich diese.

Aus der graphischen Darstellung Pl. III gehen nun sogleich zwei Umstände hervor. Erstens ist R/r bei weitem nicht konstant. Wäre dies der Fall, so würden alle Kurven gerade Linien werden, was man streng genommen doch nicht von ihnen sagen kann. Ferner

zeigt es sich, daſs die Kurven in zwei Gruppen fallen; in der einen nimmt R/r immer mehr ab, während in der anderen der Quotient bis zu einem Minimum abnimmt, um darauf wieder zu wachsen. Erstere Gruppe mit immer mehr abnehmendem R/r umfaſst alle Ergogramme mit langsamem Takte, von 6 bis 30 pr. Min. Die andre Gruppe enthält die in schnellem Takte ausgeführten Ergogramme, von 40 pr. Min. und aufwärts. Diese Verschiedenheit ist um so interessanter, da es sich erweist, daſs sie gerade derjenigen Sonderung unter unbegrenzten und begrenzten Ergogrammen entspricht, die wir früher einzig und allein wegen der Form der Ergogramme einführten. Es wurde nämlich (vgl. S. 139) nachgewiesen, daſs für die hier betrachtete V-P alle Ergogramme mit schnellerem Takt als 30 pr. Min. begrenzt waren, und bei diesem Takt hört gerade die fortwährende Abnahme des R/r auf. Wir haben an diesem Verhältnisse also zweifelsohne einen numerischen Ausdruck für die Verschiedenheit der Form der Kurven. Daſs diese Übereinstimmung der Form der Ergogramme mit der Variation von R/r nichts Zufälliges, möglicherweise Individuelles ist, geht — wenn es anders eines Beweises bedarf — deutlich aus Tab. 27 und 29 hervor, wo die Ausmessung von Dr. B's Ergogrammen angeführt ist. Rücksichtlich dieser V-P gaben noch 40 pr. Min. unbegrenzte und erst 60 pr. Min. begrenzte Ergogramme. Aus den genannten Tabellen ist nun zu ersehen, daſs R/r beim ersteren Takte fortwährend abnimmt, während beim letzteren Takte der Quotient ein Minimum erreicht und darauf wieder steigt.

Aus Untersuchungen über die Unterschiedsempfindlichkeit für Lichtempfindungen weiſs man, daſs der Quotient R/r bei schwächeren Reizen mit wachsendem Werte von R bis zu einem Minimum abnimmt, worauf er (vgl. S. 70) bei sehr starken Reizen wieder steigt. Wir sehen nun, daſs hinsichtlich der Muskelarbeit eine ganz entsprechende Variation von R/r bei den begrenzten Ergogrammen stattfindet, während R/r bei den unbegrenzten fortwährend abnimmt. Und da diese Verschiedenheit von Umständen herrührt, die wir vollständig zu beherrschen vermögen, gibt es hier eine Möglichkeit, daſs wir uns die Ursache dieses eigentümlichen Verhält-

nisses erklären können. Ferner leuchtet es ein, dafs die grofse Übereinstimmung der Variationen von R/r auf den beiden Gebieten zur Folge haben mufs, dafs dasselbe mathematische Gesetz sich als an beiden Orten gültig erweist. Für die Unterschiedsempfindlichkeit fanden wir die Variationen von R/r ausgedrückt durch Gleich. 43 (28), dieses Unterscheidungsgesetz war aber als Differenzgleichung aus Gleich. 40, der korrigierten Mafsformel, abgeleitet. Es hat nun alle mögliche Wahrscheinlichkeit für sich, dafs wir in Gleich. 40 für die Empfindung E nur die Gröfse A der Muskelarbeit zu setzen brauchen, wodurch wir bekommen:

$$A = c_2 \log.\left[\frac{R}{R_0}(a - a_1 \log. R)\right] \text{ oder, indem } \frac{a}{R_0} = a_6 \text{ und } \frac{a_1}{R_0} = a_7:$$

$$A = c_2 \log. [R\,(a_6 - a_7 \log. R)] \quad \ldots \quad \text{(Gleich. 49)}$$

als Ausdruck für die Abhängigkeit der verrichteten Muskelarbeit von der Anzahl der Partialarbeiten. Da Gleich. 40 aber für Lichtempfindungen nur gültig ist, solange R/r mit wachsenden Werten von R abnimmt, so kann Gleich. 49 auch nur für die unbegrenzten Ergogramme und für denjenigen Teil der begrenzten gültig sein, in welchem R/r abnimmt. Wie die Sache sich für den übrigen Teil der begrenzten Ergogramme stellt, das mufs natürlich der Gegenstand einer besonderen Untersuchung werden. Bevor wir die Stichhaltigkeit dieser Betrachtungen darlegen, müssen wir aber notwendigerweise noch ein anderes Verhältnis, die remanente Ermüdung nämlich, ins reine bringen. Sie ist für die Muskelarbeit von so wesentlicher Wichtigkeit, dafs wir uns keine Hoffnung machen dürfen, eine genaue Formel für die Gröfse der Muskelarbeit zu finden, wenn wir sie nicht mit in Rechnung bringen können.

Bevor ich aber die Betrachtungen über die Kurven im Pl. III abschliefse, mufs ich auf noch einen Umstand aufmerksam machen. Wie man sieht, verläuft der letzte Teil der unbegrenzten Ergogramme fast geradlinig und parallel zur Abscissenachse. Dies will mit anderen Worten heifsen, dafs das Webersche Gesetz für diese Äste der Kurven beinahe gültig ist. Nun sind die Psychologen bekanntlich nicht verwöhnt, was die Gültigkeit dieses Gesetzes betrifft; da man keine Übereinstimmung mit dem-

selben erreichen konnte, war man gewöhnlich hocherfreut, wenn die Zahlen auch nur innerhalb eines bescheidenen kleinen Umfangs paſsten. Untere und obere Abweichungen hat man sich im Laufe der Zeit als dermaſsen selbstverständlich zu betrachten gewöhnt, daſs man zuletzt gar nicht sah, in wie groſsem Umfange solche zu finden waren. Ich bezweifle deshalb auch nicht, daſs der geradlinige Teil der Kurven im Pl. III als ein guter Beweis für die Gültigkeit des Gesetzes auf diesem Gebiete betrachtet werden wird, indem man — wie gewöhnlich — den ganzen übrigen Ast der Kurven ignoriert. Dies ist natürlich aber eine durchaus verwerfliche Betrachtung der Sache. Stellt man die Frage auf: welche der Kurven im Pl. III entsprechen dem Weberschen Gesetze am meisten, so sind dies unbedingt die drei kleinen: ∞F, ∞v und ∞h. Denn für diese drei Kurven sind sämtliche Werte von R/r am wenigsten verschieden. Diese drei Kurven rühren aber, wie oben (S. 144) beschrieben, von den Ergogrammen her, die mit umbundenem Arm, wo die Blutzirkulation möglichst gehemmt war, hervorgebracht wurden. Es kann natürlich keine Rede davon sein, eine völlige Hemmung des Stoffwechsels auf diese Weise zu bewirken, alle unsere Versuche zeigen aber, daſs wir uns konstanten Werten von R/r um so mehr nähern, je geringeren Einfluſs der Blutumlauf erhält. Je schneller der Takt ist, in welchem gearbeitet wird, um so langsamer sinkt der Wert von R/r, und um so früher beginnen die Werte wieder zu steigen. Und dies geschieht am geschwindesten, wenn wir durch künstliche Mittel den Stoffwechsel zu hemmen suchen. Es scheint also keinem Zweifel unterworfen zu sein, daſs die Gröſse der Muskelarbeit sich wirklich nach dem Weberschen Gesetze richten würde, wenn der Muskel gar keine Nahrung erhielte. Dies läſst sich natürlich nur durch myographische Messungen erreichen; die bisher vorliegenden sind aber nicht zu gebrauchen, um das Verhältnis nachzuweisen, da sie, meines Wissens, alle mit konstanter Belastung ausgeführt wurden, was nicht fortwährend die maximale Arbeit ergibt. Gehen wir aber davon aus, daſs man für den nichtgenährten Muskel die Arbeit $A = c \cdot \log. R$ haben wird, was recht wahrscheinlich ist, und ver-

gleichen wir diesen Ausdruck mit Gleich. 49, die für den genährten Muskel gilt, so sehen wir, daſs diese Formeln sich nur durch den Faktor $a_6 - a_7 \cdot \log. R$ voneinander unterscheiden, der also von dem Einflusse des Stoffwechsels auf die Gröſse der Muskelarbeit herrühren muſs. Dies stimmt völlig mit dem überein, was wir früher fanden. Bei der rationellen Entwickelung des Unterscheidungsgesetzes für Lichtempfindungen wurde nachgewiesen, daſs der Faktor $a - a_1 \log. R$ als Ausdruck für einen vitalen Prozeſs, der wahrscheinlich der Stoffwechsel war, mitkam. Bei der Muskelarbeit sehen wir nun, daſs dieser Faktor aller Wahrscheinlichkeit nach verschwindet, wenn der Stoffwechsel ausgeschlossen wird. Die Bedeutung des Faktors scheint somit festgestellt zu sein.

Die remanente Ermüdung. Wenn eine Muskelgruppe bis zu völliger Ermüdung gearbeitet hat, dauert es gewisse Zeit, bis sie sich wieder erholt, so daſs sie aufs neue ebenso groſse Arbeit wie vorher leisten kann. Wie lange Zeit erforderlich ist, hängt wahrscheinlich davon ab, ein wie groſser Teil der Muskeln des Körpers in Thätigkeit gewesen ist. Ist der ganze Körper ermüdet, z. B. nach einer anstrengenden Bergwanderung, so wird bekanntlich das Ausruhen während einer einzigen Nacht nicht immer zur völligen Erholung genügen. Handelt es sich dagegen nur um eine kleinere Muskelgruppe, wie die bei den ergographischen Versuchen thätige, so wird eine ungefähr dreistündige Ruhe hinreichen, um den ursprünglichen Status wiederherzustellen. Dies geht z. B. aus den beiden Ergogrammen Pl. XVI, A und Pl. XI, B hervor, die an demselben Tage, letzteres 3 Stunden nach ersterem, von derselben V-P, A. L., ausgeführt wurden; der Takt war bei beiden Versuchen selbstverständlich derselbe, 40 pr. Min. Nun ist es offenbar unmöglich, sich durch bloſse Betrachtung zweier solcher Ergogramme mehr als ein ungefähres Gutachten zu bilden, ob dieselben sich an Gröſse und Form ähnlich sind. Zu genauer Vergleichung wird es notwendig sein, die eine Kurve über die andere zu legen. Hierbei ist es ganz überflüssig, alle kleinen, zufälligen Unregelmäſsigkeiten mitzunehmen, da diese den Vergleich eher erschweren würden. Ich verfuhr deshalb

folgendermafsen. Ich teile das Ergogramm in Gruppen von 10 Partialarbeiten; ist der Rest kleiner als 5, so wird er zur letzten Gruppe gezählt, sonst bildet er eine Gruppe für sich. Für jede Gruppe nehme ich das Mittel der Gröfse der Partialarbeiten. Diese Mittelzahlen geben dann ein ziemlich genaues Bild von dem Verlaufe der Kurve. Werden die beiden genannten Ergogramme auf diese Weise behandelt, so erhält man die in der Tab. 23 angegebenen Werte für die successiven Mittelzahlen. Einen besseren Überblick als den von der blofsen Betrachtung der Zahlen gewährten erhält man durch das graphische Aufzeichnen der Resultate. Dies ist Pl. IV, A

Tab. 23.

Pl. XVI, A	4,8	4,0	3,3	2,7	2,0	1,5	1,3	1,2	0,9	0,7	0,6	
Pl. XI, B	4,9	3,7	3,2	2,8	2,3	1,9	1,6	1,3	1,1	1,0	0,9	0,7

gezeigt. Die Ordinaten sind gleich weit abstehend mit 10 mm Zwischenraum genommen, und ihre Höhen sind die in der Tab. 23 angeführten Mittel. Die gebrochenen Linien durch die Endpunkte der Ordinaten zeigen also den Verlauf der beiden Ergogramme. Die Figur zeigt, dafs die beiden Kurven sehr nahe aneinanderfallen, ohne sich jedoch während irgend einer Strecke zu decken. Man lernt also hieraus, dafs selbst, wenn man Sorge trägt, alle äufseren und inneren Umstände möglichst gleich zu behalten, doch stets so viele zufällige Verhältnisse auf die Gröfse der Muskelarbeit influieren, dafs die Ergogramme sich gewöhnlich nicht decken werden. Dieses Ergebnis erhält wesentliche Bedeutung für unsere folgenden Betrachtungen.

Wir erheben jetzt die Frage: wie wird das Verhältnis zwischen den Ergogrammen, wenn man die Muskeln sich nicht völlig ausruhen läfst, sondern neue Arbeit von ihnen verlangt, während nach der vorhergehenden Arbeit noch einige Ermüdung remanent ist? Dies läfst sich leicht durch eine Reihe von Versuchen beantworten. Nach Ausführung eines Ergogramms läfst man die Hand z. B. 10 Min. ruhen; darauf wird ein neues Ergogramm ausgeführt, dann 10 Min. Pause, u. s. w. Die durch eine solche Versuchsreihe entstan-

denen Ergogramme sind Pl. XVI, B—E wiedergegeben. Als V-P that A. L. Dienste; der Takt war 40 pr. Min., der zeitliche Zwischenraum zwischen den einzelnen Arbeiten 10 Min. Des näheren Vergleiches wegen berechnete ich wie oben das Mittel für Gruppen von 10 Partialarbeiten; diese Mittel sind für jedes der vier Ergogramme in der Tab. 24 angeführt. Im Pl. V ist aufserdem eine graphische Darstellung der Ergebnisse gegeben, die indes zu verschiedenen Bemerkungen veranlafst. Erstens ist Pl. V in doppelt so grofsem Mafsstabe gezeichnet als Pl. IV, A, da die Kurven sonst zu nahe aneinanderfallen würden. Ferner ist jede Kurve mit ihrer besonderen Linie, vollständig aufgezeichnet oder verschiedenartig punktiert, abgebildet, damit man die Kurven leichter auseinanderhalten kann. Endlich legte ich, wie aus der Figur zu ersehen, die Kurven auf bestimmte Weise im Verhältnis zu einander. Zuerst wurde das gröfste Ergogramm, durch eine ununterbrochene Linie angegeben, mit einem Abstande von 20 mm zwischen den Ordinaten, gezeichnet. In dieser Kurve suchte ich darauf die Punkte auf, deren Ordinaten den gröfsten Mitteln der anderen drei Ergogramme entsprechen. Diese Punkte wurden zu Ausgangspunkten der drei letzteren gewählt, deren Ordinaten übrigens ebenfalls gleich weit, 20 mm, voneinander abstehend gelegt wurden. Die vier Kurven unterscheiden sich, wie man sieht, eigentlich nur dadurch voneinander, dafs sie mit verschiedener Höhe anfangen. Wegen des grofsen Mafsstabs treten die kleinen Verschiedenheiten derselben als unverhältnismäfsig grofs hervor; in der Wirklichkeit weichen die vier Kurven nirgends mehr voneinander ab, als die beiden im Pl. IV, A. Die Abweichungen sind daher zunächst als von zufälligen Umständen herrührend zu betrachten; der einzige bedeutende Unterschied ist der, dafs das Ergogramm in immer geringerer

Tab. 24.

Pl. XVI, B	4,3	3,4	2,6	2,0	1,5	1,2	0,8	0,6
Pl. XVI, C		3,4	2,8	2,6	2,2	1,5	1,3	0,9
Pl. XVI, D			2,8	2,5	1,8	1,4	1,2	1,0
Pl. XVI, E				2,1	1,6	1,4	1,2	1,0

Höhe anfängt, je gröfsere Fortschritte die remanente Ermüdung macht. Nennen wir das mit ungeschwächten Kräften ausgeführte Ergogramm das vollständige, die übrigen die unvollständigen, so wird also jedes unvollständige Ergogramm aus dem vollständigen dadurch zu erhalten sein, dafs man sich einen immer gröfseren Teil des letzteren weggeschnitten denkt. Dafs diese Übereinstimmung zwischen Ergogrammen, die in verschiedenen Stadien remanenter Ermüdung hervorgebracht werden, kein reiner Zufall ist, läfst sich leicht nachweisen.

Pl. XVII, A—E zeigt 5 von Fnn ausgeführte Ergogramme; der Takt war 40 pr. Min., der Zeitraum zwischen zwei aufeinanderfolgenden Kurven betrug 15 Min. Behandeln wir diese Ergogramme ebenso wie die vorigen, indem wir für jede Gruppe von 10 Partialarbeiten das Mittel nehmen, so erhalten wir die in der Tab. 25 angeführten Werte. Graphisch sind die Resultate Pl. V wiedergegeben, wo die Kurven auf dieselbe Weise ein-

Tab. 25.

Pl. XVII, A	3,2	2,2	1,6	1,6	1,2	1,0	0,7	0,6	
Pl. XVII, B		2,2	1,5	1,4	1,2	0,8	0,8	0,6	0,5
Pl. XVII, C		2,7	1,8	1,3	1,1	1,0	0,9	0,8	0,6
Pl. XVII, D		2,3	1,5	1,4	1,1	0,8	0,6		
Pl. XVII, E			1,9	1,7	1,1	0,8	0,6		

gezeichnet sind wie die vier im Pl. XVI, B—E. Das vollständige, durch eine ununterbrochene Linie wiedergegebene Ergogramm wurde also zuerst gezeichnet, die vier anderen von denjenigen Punkten des vollständigen Ergogramms aus, deren Ordinaten den Anfangsordinaten der unvollständigen entsprechen. Wie man sieht, kreuzen diese fünf Kurven sich an so vielen Punkten, dafs ihre gegenseitigen Abweichungen als rein zufällig betrachtet werden dürften.

Die bisher betrachteten beiden Versuchsreihen wurden um einen verhältnismäfsig frühen Zeitpunkt ausgeführt, als die Übung der V-P noch gering war. Die entstandenen Ergogramme sind deshalb klein, sowohl die Höhe als die Länge ist unbeträchtlich. Bei fortschreitender Übung verändert sich dies; der Einflufs

der remanenten Ermüdung wird darum aber doch nicht geringer; eher wird er auffallender, weil die grofsen Ergogramme die Möglichkeit weit gröfserer Veränderungen öffnen. Dies geht z. B. aus den beiden d. 6/5 von A. L. ausgeführten Kurven Pl. XVIII, A und B hervor. Der Takt war 40 pr. Min. Die Kurve A wurde 5 Min. nach dem Pl. XIII, C wiedergegebenen vollständigen Ergogramm aufgenommen, die Kurve B wieder 5 Min. nach Abschlufs von A. Die Mittel der successiven Gruppen von 10 Partialarbeiten sind Tab. 26 angeführt. Die Zahlen selbst zeigen sogleich den grofsen

Tab. 26.

Pl. XIII, C	6,2	5,6	4,7	4,2	3,7	3,2	2,7	2,1	1,8	1,5
Pl. XVIII, A				3,6	3,6	3,4	2,9	2,7	2,1	1,6
Pl. XVIII, B						3,4	3,0	2,5	2,0	1,7

Pl. XIII, C	1,4	1,3	1,1	1,0	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3
Pl. XVIII, A	1,5	1,4	1,2	1,0	0,7	0,5	0,4		
Pl. XVIII, B	1,4	1,0	0,9	0,6					

Einflufs der remanenten Ermüdung; die graphische Darstellung, Pl. IV, B. wurde ebenso ausgeführt wie in den vorhergehenden Fällen. Das erste unvollständige Ergogramm weicht allerdings eine Strecke lang ziemlich bedeutend von dem vollständigen ab, später fallen sie aber fast ganz miteinander zusammen, und dies gilt auch von dem zweiten unvollständigen Ergogramme in dessen ganzem Verlauf. Die Nichtübereinstimmung scheint also auch hier auf zufälligen Umständen zu beruhen; unserer früheren Erfahrungen eingedenk können wir kaum bezweifeln, dafs eine Wiederholung der Versuche eine ganz andere gegenseitige Lage der beiden Kurven ergeben würde. Fassen wir diese verschiedenen Beobachtungen zusammen, so kommen wir also zu folgendem Resultate:

Das in irgend einem Stadium der remanenten Ermüdung hervorgebrachte unvollständige Ergogramm beginnt mit geringerer Höhe als das vollständige Ergogramm, hat sonst aber annäherungsweise denselben Verlauf wie letzteres. Die remanente Ermüdung

wirkt also wie eine — gröfsere oder geringere — Anzahl von Partialarbeiten, die unmittelbar vor Anfang des unvollständigen Ergogramms ausgeführt wurden.

Das Arbeitsgesetz. Wir sind nun so weit gelangt, dafs wir im stande sind, einen Ausdruck für die Abhängigkeit der verrichteten Muskelarbeit von der Anzahl der Partialarbeiten zu formulieren. Es wurde oben (S. 152) nachgewiesen, dafs der Quotient R/r zwischen der Anzahl der successiven Partialarbeiten auf gesetzmäfsige Weise variiert, wenn die verrichtete Arbeit wie eine arithmetische Progression anwächst. Und ein Vergleich mit entsprechenden Verhältnissen auf anderen Gebieten führte zu dem Resultat, dafs man wahrscheinlich als Ausdruck für die Gröfse der Arbeit haben würde:

$$A = c_2 \log. [R (a_6 - a_7 \log. R)] \quad . \; . \; . \; . \text{ (Gleich. 49)},$$

wo R diejenige Anzahl Partialarbeiten bezeichnet, welche zur Lieferung der Arbeitsmenge A erforderlich ist, während c_2, a_6 und a_7 Konstanten sind. Dieser Ausdruck kann natürlich aber nur für ein vollständiges Ergogramm gültig sein, da wir ja sahen, dafs während remanenter Ermüdung weniger Arbeit geleistet wird. Gleich. 49 mufs jedoch leicht so erweitert werden können, dafs sie auch die unvollständigen Ergogramme umfafst, da man sich stets denken kann, statt der remanenten Ermüdung eine gewisse Anzahl unmittelbar vorher ausgeführter Partialarbeiten zu haben. Setzen wir also in Gleich. 49 $R + y$ statt R, indem y diejenige Anzahl Partialarbeiten bedeutet, welche dieselbe Wirkung haben würde wie die vorhandene remanente Ermüdung, so mufs die Gleichung auch für alle dem vollständigen Ergogramm entsprechenden unvollständigen gültig sein. $y = 0$ würde dann wieder das vollständige Ergogramm geben — wenn vor dessen Ausführung jede Spur einer remanenten Ermüdung entfernt wäre. Es ist übrigens die grofse Frage, ob ein solcher Fall jemals im täglichen Leben eintritt, wenn man keine besonderen Mafsregeln trifft, um ihn herbeizuführen. Unter gewöhnlichen Verhältnissen ist es ja kaum möglich, den Gebrauch der linken Hand gänzlich zu vermeiden, und

selbst wenn man dies zu verhüten sucht, weiſs man ja, daſs der starke Gebrauch einiger Muskeln die Arbeitsfähigkeit der nicht benutzten Muskeln schwächt. Alle diese Umstände im Verein scheinen mit Notwendigkeit bewirken zu müssen, daſs völlige Abwesenheit der remanenten Ermüdung sich im täglichen Leben leichter denken als nachweisen läſst. Die Folge hiervon wird daher, daſs wir selbst für die vollständigen Ergogramme $y > 0$ haben müssen, so daſs das »Arbeitsgesetz« also folgende Form erhält:

$$A = c_2 \log. \left[(R + y)\left(a_6 - a_7 \log. (R + y)\right)\right].$$

Wollen wir nun die Gültigkeit dieser Gleichung an den vorliegenden Ergogrammen prüfen, so zeigt sich sogleich die Schwierigkeit, daſs wir nicht im stande sind, die Gröſse der Konstanten zu bestimmen. Wir können die Gleichung freilich ein wenig umformen:

$$A = c_2 \log. \left[(R + y)\, a_7 \left(\frac{a_6}{a_7} - \log. (R + y)\right)\right] =$$

$$c_2 \log. (R + y) + c_2 \log. a_7 + c_2 \log. \left[\frac{a_6}{a_7} - \log. (R + y)\right]$$

Setzt man hier $c_2 \log. a_7 = q$ und $a_6/a_7 = q_1$, so erhält man:

$$A = q + c_2 \log. (R + y) + c_2 \log. [q_1 - \log. (R + y)] \quad \ldots . \text{(Gleich. 50)}.$$

In dieser Gleichung lassen q und c_2 sich allerdings mittels der vorliegenden Messungen bestimmen, y und q_1 dagegen, die in logarithmischen Funktionen vorkommen, können nicht direkt bestimmt werden. Was y betrifft, ist die Schwierigkeit nicht so groſs, solange man sich nur mit vollständigen Ergogrammen beschäftigt, wo y eine ganze Zahl ist und einen von 0 nur wenig verschiedenen Wert hat. Prüft man durch successives Einsetzen von 1, 2, 3 u. s. w. für y, welcher Wert mit den Messungen am besten übereinstimmt, so wird man schnell zu einem Resultat gelangen. Schlimmer geht es mit q_1, von dessen Gröſse man von vornherein keine Vorstellung haben kann, und dessen hinlänglich genaue Bestimmung durch bloſses Probieren deshalb äuſserst beschwerlich sein wird. Zum Teil kann indes Abhilfe verschafft werden. Gleich. 50 zufolge sollten beide Glieder nämlich denselben Faktor c_2 haben; setzt man

nun statt des letzten c_2 ein q_2, so dafs die Gleichung folgende Form erhält:

$$A = q + c_2 \log. (R + y) + q_2 \log. [q_1 - \log. (R + y)]$$
. . . . (Gleich. 51),

so hat man also drei Konstanten, q, c_2 und q_2, die sich mit Genauigkeit bestimmen lassen, und hierdurch wird also der Fehler zum Teil ausgeglichen, den man durch eine weniger angemessene Wahl des q_1 einführt. Es ist der in Gleich. 51 gegebene Ausdruck, dessen Gültigkeit für die vorliegenden ergographischen Messungen wir jetzt prüfen sollen.

Wie früher (S. 154) erwähnt, läfst sich die Gültigkeit der Gleich. 49 und 51 indes nur erwarten, solange R/r mit wachsenden Werten von R abnimmt; die Formel kann mit anderen Worten nur für die unbegrenzten Ergogramme und für den einen Ast der begrenzten gültig sein. Es wird nun ganz natürlich sein, mit der Untersuchung der Gültigkeit rücksichtlich der unbegrenzten Ergogramme anzufangen, da wir hier sicher gehen können, keine Komplikationen anzutreffen. Zu diesem Zwecke wählen wir zwei der früher besprochenen, von verschiedenen Versuchspersonen bei verschiedenem Takte ausgeführten Ergogramme. Die Ausmessungen derselben sind Tab. 27 und 28 angegeben; wir nehmen nun jede für sich.

Tab. 27.

Dr. B. 40 pr. Min. Pl. XV, A.

A	$\triangle A$	R	$\frac{R}{r}$	A ber.	f
5,0 *		1		5	0,0
23,1	18,1	5		28	— 4,9
43,4	20,3	10	2,000	50	— 6,6
65,2	21,8	16	1,600	71	— 5,8
83,4	18,2	22	1,375	87	— 3,6
103,2	19,8	29	1,318	105	— 1,8
123,1 *	19,9	37	1,276	123	+ 0,1
144,0	21,0	46	1,243	141	+ 3,0
164,8	20,8	56	1,217	159	+ 5,8
184,0	20,0	69	1,232	180	+ 4,0
203,6	19,6	83	1,203	203	+ 0,6
223,1	19,5	97	1,169	222	+ 1,1
243,5	20,4	112	1,155	242	+ 1,5
263,3 *	19,8	129	1,151	263	+ 0,3
283,6	20,3	147	1,140	284	— 0,4

Tab. 28.

A. L. 30 pr. Min. Pl. XII, A.

A	R	A ber.	f
17,9	3	15	+ 2,9
39,1	7	42	— 2,9
59,4	11	64	— 4,6
78,5	15	83	— 4,5
100,4	20	103	— 2,6
119,4	25	123	— 3,6
138,0	30	145	— 7,0
159,6	36	163	— 3,4
178,8	42	180	— 1,2
200,6	49	202	— 1,4
221,7	56	218	+ 3,7
242,1	64	238	+ 4,1
261,0	72	258	+ 3,0
282,0	83	280	+ 2,0
302,7	95	304	— 1,3
322,1	107	326	— 3,9
342,4	119	347	— 4,6
363,2	131	366	— 2,8
384,0	144	384	0,0
404,6	158	407	— 2,4
425,1	173	426	— 0,9

Tab. 27 ist wie Tab. 21 und 22 geordnet, indem die successiven Werte von A soweit möglich eine konstante Differenz, 20 cm-K. haben, was aus der Kolonne $\triangle A$ hervorgeht, wo diese Differenzen angeführt sind. Unter R ist die Anzahl der Partialarbeiten mitgeteilt, die erforderlich sind, um die entsprechende, unter A angegebene Arbeitsmenge hervorzubringen. Aus dem Quotienten R/r ist zu ersehen, dafs das Ergogramm unbegrenzt ist, da R/r mit wachsenden Werten von R fortwährend abnimmt. Um nun die Gültigkeit der Gleich. 51 zu prüfen, müssen wir Werte für q_1 und y wählen. Ziemlich willkürlich setzte ich $q_1 = 3{,}05$, während es sich erweist, dafs $y = 3$ eine passende Gröfse ist. Darauf lassen sich also q, c_2 und q_2 bestimmen; will man die wahrscheinlichsten Werte haben, so mufs die Bestimmung mittels der Methode der kleinsten Quadrate geschehen. Dies würde zu einer unverhältnismäfsig grofsen Berechnung mit zum Teil sehr grofsen Zahlen zwingen; ich zog es deshalb vor, mich auf eine viel bequemere, eigentlich aber mehr überzeugende Methode zu beschränken. Die drei in der Tab. 27 mit *

bezeichneten Werte von A wurden nebst den entsprechenden Werten von R in Gleich. 51 eingesetzt. Man erhält hierdurch drei Gleichungen, in denen nur q, c_2 und q_2 als Unbekannte vorkommen; diese drei Gröſsen lassen sich folglich finden. Auf diese Weise erhält man $q = 488$, $c_2 = -122$ und $q_2 = -1053$, also bekommt man für dieses Ergogramm folgende Formel:

$$A = 488 - 122 \log.(R + 3) - 1053 \log.[3{,}05 - \log.(R + 3)].$$

Aus der Gleichung läſst sich A berechnen, wenn man die verschiedenen Werte von R einsetzt; die auf diese Weise gefundenen Gröſsen sind in der Tab. 27 unter »A ber.« angeführt. Unter f ist überdies die Abweichung der gemessenen von den berechneten Werten angegeben. Abweichungen sind zu finden, wie man sieht; dieselben sind aber erstaunlich klein, wenn man bedenkt, daſs zwei der in der Formel vorkommenden Konstanten ziemlich willkürlich gewählt sind, während drei andere nur mittels drei Gruppen von Werten für A und R bestimmt wurden, mithin an zufälligen Fehlern leiden. Bestimmte man die wahrscheinlichen Werte von q, c_2 und q_2, so müſsten die Abweichungen der Berechnung von der Messung bedeutend kleiner werden, und wäre es möglich, für sämtliche fünf Konstanten in Gleich. 51 die wahrscheinlichen Werte zu finden, so würden diese Abweichungen zweifellos bis auf rein verschwindende Gröſsen reduziert werden. Im Folgenden werden wir sehen, daſs eine glücklichere Wahl des q_1 und des y die Fehler wirklich sehr bedeutend vermindert.

Wir nehmen nun die Tab. 28 vor. Dieses Ergogramm findet sich bereits Tab. 21 angeführt, deshalb gebe ich hier nur die zusammengehörenden Werte von A und R an. In Gleich. 51 ist $q_1 = 4{,}00$ und $y = 4$ gesetzt. Um nun gar zu groſse Fehler der Konstanten q, c_2 und q_2 zu vermeiden, bestimmte ich diese wie oben durch drei Gruppen willkürlich gewählter Werte von A und R, diese Bestimmung führte ich jedoch zweimal mit verschiedenen Gruppen von Werten aus, worauf ich das Mittel der gefundenen Gröſsen nahm. Ich erhalte hierdurch $q = 2378$, $c_2 = -434$ und $q_2 = -4000$. Die Formel wird also:

$$A = 2378 - 434 \log.(R + 4) - 4000 \log.[4{,}00 - \log.(R + 4)].$$

Die hieraus berechneten Werte für A nebst den Abweichungen zwischen A und »ber. A« sind in Tab. 28 angegeben. Wie man sieht, sind die Fehler ungefähr von derselben Gröſse wie in Tab. 27, und überdies variieren sie fast auf dieselbe Weise. Wie groſs die Übereinstimmung der berechneten Werte mit den gemessenen ist, läſst sich am besten aus der graphischen Darstellung Pl. VI ersehen. Als Abscisse wurde R, als Ordinate A abgesetzt; die einzelnen gemessenen Werte von A sind durch kleine Kreise bezeichnet, während die berechnete Kurve ohne besondere Markierung der eingeführten Ordinaten abgesetzt ist. Die beiden Kurven fallen so nahe aneinander, daſs die Gültigkeit der Gleich. 51 wohl keinen Zweifel erleiden kann, namentlich wenn man bedenkt, daſs ihre Abweichung voneinander durch eine genaue Bestimmung der Konstanten beträchtlich reduziert werden würden.

Es erübrigt nun, die Gültigkeit der Gleich. 51 für die begrenzten Ergogramme zu prüfen. Wir wählen auch hier zwei von verschiedenen Versuchspersonen bei verschiedenem Takte ausgeführte Ergogramme; die Messungen sind Tab. 29 und 30 angegeben. Die nähere

Tab. 29.

Dr. B. 60 pr. Min. Pl. XIV, B.

A	$\triangle A$	R	$\frac{R}{r}$	A ber.	f	A_1	f_1
20,7 *		4		20	+ 0,7		
40,7	20,0	8	2,000	38	+ 2,7		
59,3	18,6	12	1,500	57	+ 2,3		
80,1	20,8	17	1,417	80	+ 0,1		
100,0	19,9	22	1,294	98	+ 2,0		
118,5	18,5	27	1,227	119	— 0,5		
139,1 *	20,6	33	1,222	139	+ 0,1		
158,2	19,1	39	1,182	158	+ 0,2		
176,9	18,7	45	1,154	174	+ 2,9		
196,3	19,4	52	1,156	193	+ 3,3		
216,9	20,6	60	1,154	218	— 1,1		
236,2 *	19,3	68	1,133	236	+ 0,2		
255,8	19,6	78	1,147	261	— 5,2	258,0	— 2,2
276,1	20,3	90	1,154	285	— 8,9	274,8	+ 1,3
296,6	20,5	105	1,167	315	— 18,4	295,8	+ 0,8
316,3	19,7	121	1,152	343	— 27,7	316,6	— 0,3
336,9	20,6	140	1,157	380	— 43,1	339,8	— 2,9
357,6	20,7	160	1,145	409	— 51,4	356,8	+ 0,8

Tab. 30.

A. L. 40 pr. Min. Pl. XI, B.

A	R	A ber.	f	A_1	f_1
21,4 *	4	21	+ 0,4		
39,9	8	40	— 0,1		
60,5	13	59	+ 1,5		
78,8	18	78	+ 0,8		
98,5 *	24	99	— 0,5		
117,2	30	115	+ 2,2		
136,9	37	134	+ 2,9		
156,9	45	154	+ 2,9		
176,2 *	54	176	+ 0,2		
195,4	65	202	— 6,6	198,0	— 2,4
215,8	80	230	— 14,2	214,0	+ 1,8
235,2	98	264	— 28,8	233,6	+ 1,6
255,1	124	308	— 52,9	256,8	— 1,7

Ordnung der Tabelle ist ebenso wie vorher. Aus dem Quotienten R/r in Tab. 29 sieht man, dafs das Ergogramm ein begrenztes ist, indem R/r bis auf ein Minimum sinkt, worauf es wieder, obschon etwas unregelmäfsig, steigt. Es läfst sich also erwarten, dafs Gleich. 51 nur für den ersten Teil gültig ist. Zur Berechnung der Konstanten sind deshalb selbstverständlich nur solche Werte von A zu gebrauchen, die innerhalb der Grenzen der Gültigkeit des Gesetzes liegen; die mit * bezeichneten wurden benutzt. Setzt man nun in der Gleich. 51 $q_1 = 4{,}00$ und $y = 4$, so findet man wie oben mittels der drei Gruppen von zusammengehörenden Werten für A und R die Konstanten $q = 2946$, $c_2 = -591$ und $q_2 = -4871$. Man hat folglich die Gleichung:

$$A = 2946 - 591 \log. (R+4) - 4871 \log. [4{,}00 - \log. (R+4)],$$

woraus sich A durch successives Einsetzen der Werte von R berechnen läfst. Die auf diese Weise bestimmten Gröfsen sind unter »A ber.« angeführt; die Berechnung ist auch bis über die Grenzen der Gültigkeit des Gesetzes hinaus durchgeführt. Aus der Kolonne f sind die Abweichungen der Berechnung von der Messung zu ersehen. Hieraus geht hervor, dafs die Gleichung sehr gut pafst, solange R/r abnimmt; die Fehler sind hier sehr klein. Dafs dieselben sich nicht gleichmäfsig nach positiver und negativer Richtung verteilen, hat hier

nichts zu bedeuten; dies findet seinen Grund ausschliefslich darin, dafs bei der Bestimmung der Konstanten der Gleichung keine Dezimalstellen mitgenommen wurden, weshalb alle Werte unter »ber. *A*« nur mit ganzen Zahlen angeführt sind. Diese sind sämtlich um ungefähr 0,4 zu klein; wird diese Dezimale zu den berechneten Werten von *A* hinzugefügt, so werden mehrere Fehler, die mit kleinen positiven Gröfsen angeführt sind, negativ werden. Dasselbe gilt übrigens auch von den früher berechneten Ergogrammen (Tab. 27 und 28), wo der Fehler indes weniger auffällt. Es findet hier also fast verblüffende Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung statt und zwar gerade so weit, wie diese Übereinstimmung sich erwarten liefs; darauf gehen die Zahlen aber völlig voneinander ab, indem die berechneten Werte gar zu grofs sind, und ferner sieht man, dafs die Abweichungen immer mehr zunehmen. Die Divergenz beginnt ungefähr bei $R = 78$, und die Fehler sind den Zuwächsen des R annähernd proportional. Man hat mit anderen Worten: $f = q_3 \cdot (R - q_4)$, wo q_3 und q_4 zwei Konstanten sind. Bestimmt man die wahrscheinlichen Werte dieser Konstanten, so erhält man $q_3 = 0{,}6$ und $q_4 = 73$. Aus der Formel $f = 0{,}6 \cdot (R - 73)$ lassen sich also die wahrscheinlichen Fehler berechnen, und zieht man diese Gröfsen von den »ber. *A*« ab, so bekommt man die in der Kolonne A_1 angeführten Zahlen. Man sieht, dafs diese mit den gemessenen Werten von *A* sehr wohl übereinstimmen; die Abweichungen f_1 sind durchweg nicht gröfser als f für den ersten Teil der Kurve. Es geht also hieraus hervor, dafs wir für denjenigen Teil des Ergogramms, wo $R\,r$ mit wachsenden Werten von R zunimmt, die Arbeit aus folgender Formel berechnen können:

$$A_1 = 2946 - 591 \log.(R + 4) - 4871 \log.[4{,}00 - \log.(R + 4)] - 0{,}6\,(R - 73).$$

Dafs wir hier mit keinem Zufalle zu thun haben, ist leicht nachzuweisen; für jedes andere begrenzte Ergogramm gilt dasselbe. In der Tab. 30 sind die gemessenen Werte rücksichtlich eines anderen Ergogramms angegeben, bei dessen Ausführung sowohl die V-P als der Takt anders war als in Tab. 29. Das Ergogramm der Tab. 30 wurde bereits früher benutzt (siehe Tab. 21);

ich führe hier deshalb nur die Werte von A und R an. R/r nimmt mit wachsendem R ab bis $R = 54$; für diesen Teil der Kurve mufs folglich Gleich. 51 gültig sein, während für den übrigen Teil der Kurve folgender Ausdruck zu finden ist:

$$A_1 = q + c_2 \log.(R + y) + q_2 \log.[q_1 - \log.(R + y)] - q_3 (R - q_4) \text{ .. (Gleich. 52).}$$

Die Berechnungen wurden nun ganz ebenso wie früher durchgeführt; um Wiederholungen zu vermeiden, teile ich deshalb nur die Ergebnisse mit. Für den ersteren Teil des Ergogrammes erhält man folgende Formel:

$$A = 1483 - 372 \log.(R + 4) - 2713 \log.[3{,}50 - \log.(R + 4)].$$

Für den letzteren Teil dagegen:

$$A_1 = 1483 - 372 \log.(R + 4) - 2713 \log.[3{,}50 - \log.(R + 4)] - 0{,}8 (R - 60).$$

Die aus diesen Ausdrücken berechneten Werte sind nebst den Abweichungen f und f_1 der Berechnung von der Messung in der Tabelle angeführt. Wie man sieht, findet auch hier völlig befriedigende Übereinstimmung statt.

Um besseren Überblick zu gewinnen, als die Betrachtung der Zahlen allein über die Verhältnisse der begrenzten Ergogramme zu geben vermag, habe ich die Resultate der Tab. 29 im Pl. VII graphisch dargestellt. Als Abscisse wurde R, als Ordinate A abgesetzt. Die gemessenen Werte von A sind durch einen kleinen Kreis markiert. Bis $R = 73$, welcher Punkt durch einen kleinen Strich, senkrecht zur Abcissenachse, angegeben ist, gilt Gleich. 51; die daraus berechnete Kurve ist eingezeichnet, fällt aber in der gröfsten Strecke so nahe an die Kurve, die sich durch die gemessenen Werte legen läfst, dafs es nur möglich war, eine einzige Linie zu zeichnen. Von $R = 73$ an gilt Gleich. 52; die daraus berechnete und eingezeichnete Kurve fällt ebenfalls aufserordentlich nahe an die experimentell gefundene. Die punktierte, bei $R = 73$ beginnende Kurve zeigt den Verlauf, den die Kurve haben würde, wenn Gleich. 51 für das ganze Ergogramm gültig wäre. Es erweist sich, dafs dieser Ast der Kurve von den gemessenen Werten so sehr abweicht, dafs keine Möglichkeit vorliegt, die Gleich. 51 als für das ganze Ergogramm gültig zu betrachten.

Aus diesen Resultaten geht also zweifellos hervor, dafs die Sonderung zwischen begrenzten und unbegrenzten Ergogrammen keine willkürliche ist, die sich nur auf eine unwesentliche Verschiedenheit des Aussehens der Ergogramme stützte, und dafs im Gegenteil die begrenzten Ergogramme ihre eigentümliche Form dadurch erhalten, dafs in einem gewissen Stadium ein neues Moment hinzutritt. weshalb die Arbeit von diesem Augenblick an einem anderen Gesetze gemäfs anwächst als vorher. Was die Ursache dieser Veränderung ist, das wissen wir nicht. Es läfst sich einzig und allein nachweisen, dafs der Punkt, an welchem die Veränderung eintritt, fast ganz mit dem Momente zusammentrifft. da die Selbstbeobachtung konstatiert, dafs die Ermüdung schmerzhaft wird. Ein genaues Zusammentreffen der beiden Erscheinungen. der subjektiven Wahrnehmung und des objektiven Punktes, wo R/r zu wachsen beginnt, darf man natürlich nicht zu finden erwarten. Denn da die Ermüdung des arbeitenden Armes fortwährend zunimmt, fällt es der V-P sehr schwer, den Zeitpunkt anzugeben. da die Empfindung schmerzhaft wird. Bei einer gröfseren Anzahl von Versuchen, die ich hierüber anstellte, erwies es sich aber stets, dafs die Anzeige der schmerzhaften Müdigkeitsempfindung sehr nahe — bald ein wenig früher, bald ein wenig später — an den Punkt in der Reihe der Partialarbeiten fällt, wo R/r wieder zu wachsen anfängt. Welche Verbindung nun zwischen dieser Schmerzempfindung und der veränderten Zunahme der Arbeit stattfindet, vermögen wir hier nicht zu entscheiden; erst wenn wir im Folgenden dahin gelangen, den Einflufs der Bewufstseinszustände auf die Muskelthätigkeit zu untersuchen, werden wir die zur Beantwortung dieser Frage erforderlichen Daten erhalten. Hier interessiert uns die Sache nur, insofern sie die früher aufgestellte Betrachtung völlig bestätigt. Es wurde oben (S. 153) erwähnt, dafs die mittels des Bruches R/r gemessene Unterschiedsempfindlichkeit für Lichtempfindungen ganz ähnliche Schwankungen zeigt wie bei den begrenzten Ergogrammen die Gröfse R/r. Anfangs nimmt R/r mit wachsenden Werten von R ab, darauf beginnt es wieder zuzunehmen. Und der Punkt, wo R/r zu wachsen beginnt, liegt der Erfahrung zufolge

da, wo das Auge durch die starken Lichtreize geblendet zu werden anfängt. Die Verhältnisse der Lichtempfindungen scheinen denen der Muskelthätigkeit also ganz analog zu sein. Der veränderte Verlauf der Unterschiedsempfindlichkeit trifft mit dem Eintreten eines neuen Moments, der schmerzhaften Blendung zusammen. Von der Muskelarbeit, von der man sich ohne Schwierigkeit ein gröfseres Material verschaffen kann, sahen wir nun, dafs der an einem bestimmten Punkte hinzutretende Schmerz ein gesetzmäfsiges Abweichen von dem vorher gültigen Gesetze für die Zunahme der Arbeit herbeiführt. Es läfst sich daher vermuten, dafs dasselbe auch mit der Unterschiedsempfindlichkeit der Fall ist. Gerade deshalb sah ich es, wie S. 71—72 erwähnt, für berechtigt an, das Gesetz für die eine Phase der Variationen der Unterschiedsempfindlichkeit zu suchen, ohne Rücksicht darauf, dafs dieses Gesetz nicht für die andere Phase pafst. Denn der Umstand, dafs R/r zu wachsen anfängt, ist zweifellos dadurch bedingt, dafs neue Kräfte hinzutreten, und folglich weder kann noch soll dasselbe Gesetz für den ganzen Verlauf gültig sein. Dies hat sich als für die Muskelarbeit stichhaltig erwiesen, und alles deutet darauf hin, dafs es auch für die analogen Verhältnisse der Unterschiedsempfindlichkeit gilt.

Noch einen Punkt müssen wir untersuchen. Gleich. 51 gilt für alle Ergogramme; aus dieser allein oder in Verbindung mit Gleich. 52 läfst sich die Gröfse der Arbeit berechnen, sobald die Konstanten der Gleichung bekannt sind. Hierbei ist aber der Takt, in welchem die Ergogramme ausgeführt werden, durchaus nicht berücksichtigt. Und doch wissen wir, dafs der Takt einen wesentlichen Einflufs auf die gelieferte Arbeitsmenge hat; je langsamer der Takt ist, um so mehr wird in einer gegebenen Anzahl Partialarbeiten geleistet. Hieraus folgt also, dafs man für die Konstanten der beiden Gleichungen verschiedene, von dem Takte, in welchem die Ergogramme ausgeführt wurden, abhängige Werte finden mufs, oder mit anderen Worten: die Konstanten der Gleichungen müssen Funktionen des Zeitraumes zwischen den successiven Partialarbeiten sein. Es kann nicht schwer fallen, dies nachzuweisen. Man braucht nur unter sonst gleichen Verhältnissen eine Reihe Ergo-

gramme in verschiedenem Takte auszuführen; berechnet man aus diesen die Konstanten der Gleich. 51, so müssen dieselben notwendigerweise verschiedene Werte erhalten, da in jedem einzelnen Ergogramme einer gegebenen Gröſse von *R* verschiedene Werte des *A* entsprechen sollen. Das leuchtet so unmittelbar ein, daſs es keines experimentellen Beweises bedarf. Dagegen könnte es natürlich von Interesse sein, zu untersuchen, wie die Konstanten mit dem Takte, mit dem Zwischenraume zwischen den Partialarbeiten variieren. Dies wird indes gröſsere Schwierigkeiten bereiten, denn um die Gesetzmäſsigkeit zu finden, wird es offenbar eine notwendige Bedingung sein, daſs bei der Ausführung der Ergogramme alle Umstände, mit Ausnahme eben des Taktes, die gleichen sind. Sich dessen zu sichern, ist aber kaum möglich, oder besser, wir wissen mit Sicherheit, daſs es nicht thunlich ist. Denn da die verschiedenen Ergogramme nacheinander ausgeführt werden müssen, wird es nicht zu vermeiden sein, daſs die Übung, wenn auch nur ganz wenig, zunimmt, so daſs die Bedingungen also nicht mehr genau dieselben sind. Man könnte sich den Einfluſs der Übung allerdings auf die Weise eliminiert denken, daſs man nach der Ausführung einer Reihe von Ergogrammen dieselben Arbeiten in umgekehrter Reihenfolge wiederholte und darauf das Mittel der beiden in demselben Takte ausgeführten Ergogramme nähme. Hierdurch würde dann aber die Schwierigkeit entstehen, daſs es keineswegs gegeben ist, wie man diese »Mittel« eigentlich berechnen sollte. Zur Vermeidung dieser Schwierigkeit bediente ich mich des Umstands, daſs jede nicht erhaltene Übung sich allmählich verliert. Führt man die zu vergleichenden Ergogramme mit einem Zwischenraume von mehreren Tagen aus, während dessen natürlich keine anderen Ergogramme genommen werden dürfen, so kann man einigermaſsen darauf rechnen, daſs das am einen Tage Gewonnene in der dazwischenliegenden Zeit beinahe verloren geht. Nach diesem Schema wurden die folgenden vier Ergogramme ausgeführt:

Pl. XIX, A. d. $^{19}/_{9}$. 40 pr. Min. *Pl. XIX, B.* d. $^{1}/_{10}$. 10 pr. Min.
Pl. XX, A. d. $^{25}/_{9}$. 80 pr. Min. *Pl. XX, B.* d. $^{27}/_{9}$. 20 pr. Min.

Die Ausmessung dieser vier Ergogramme ist in der Tab. 31 gegeben, wo aufser A und den entsprechenden R zugleich $R r$ für die beiden begrenzten Ergogramme mitgeteilt ist, damit man sehen kann, bis wieweit Gleich. 51 gilt. Mit Bezug auf die beiden letzten Ergogramme ist nur zu bemerken, dafs ich, um gar zu lange Zahlenreihen zu vermeiden, die Differenz zwischen den successiven Werten von A doppelt so grofs wie gewöhnlich, nämlich 40 cm-K. nahm.

Tab. 31.

80 pr. Min.			40 pr. Min.			20 pr. Min.		10 pr. Min.	
A	R	$\frac{R}{r}$	A	R	$\frac{R}{r}$	A	R	A	R
22,7 *	4		18,4	3		38,3 *	6	38,4 *	6
42,2	8	2,000	35,9 *	6	2,000	78,0	13	79,1	13
63,5	13	1,625	57,6	10	1,667	117,1	21	117,0	20
83,6 *	18	1,385	79,3	14	1,400	157,2	30	155,5	28
102,1	23	1,280	99,8	18	1,285	196,4	40	196,6	37
122,2	29	1,261	119,4	22	1,222	237,2	51	237,7	47
140,8 *	35	1,207	142,2 *	27	1,228	276,8 *	63	278,3	57
160,6	47	1,343	161,9	32	1,185	316,1	76	318,1 *	67
181,1	58	1,234	180,2	37	1,157	356,7	91	359,7	78
200,7	73	1,260	199,9	43	1,162	395,1	108	399,7	89
			220,5	50	1,163	434,6	128	441,1	101
			240,3 *	58	1,160	474,0 *	149	481,7	114
			260,3	69	1,190	512,5	175	521,2	127
			280,2	84	1,217			560,0 *	140
			300,2	105	1,250			601,5	154
			320,1	153	1,457				

Für jedes dieser Ergogramme wurden ferner die Konstanten der Gleich. 51 berechnet, indem in allen vier Gleichungen $q_1 = 4{,}00$ und $y = 4$ gesetzt wurden, welche Werte sich bei den oben ausgeführten Berechnungen als die geeignetsten erwiesen hatten. Wir gelangen hierdurch zu folgenden vier Gleichungen:

80 pr. Min.: $A = 2410 - 463 \log. (R + 4) - 4010 \log. [4{,}00 - \log. (R + 4)]$

40 pr. Min.: $A = 2749 - 516 \log. (R + 4) - 4607 \log. [4{,}00 - \log. (R + 4)]$

20 pr. Min.: $A = 3269 - 634 \log. (R + 4) - 5444 \log. [4{,}00 - \log. (R + 4)]$

10 pr. Min.: $A = 5924 - 1307 \log. (R + 4) - 9599 \log. [4{,}00 - \log. (R + 4)]$

Die Berechnung der Konstanten wurde auf Grundlage der in der Tab. 31 mit * bezeichneten Werte unternommen. Aus den Gleichungen geht hervor, dafs die Konstanten, wie zu erwarten stand, mit dem Zeitraume

zwischen den Partialarbeiten zunehmen; je langsamer der Takt ist, um so gröfser werden alle drei Konstanten. Um nun über das Gesetz, nach welchem die drei Konstanten c_2, q und q_2 zunehmen, einen Überblick erhalten zu können, sind sie in der Tab. 32 zusammengestellt. Zuerst ist der Takt angegeben, darauf, unter F, das Verhältnis zwischen den zeitlichen Zwischenräumen der successiven Partialarbeiten. Diese Zahlen haben indes eine etwas gröfsere Bedeutung, als wenn sie nur Verhältniszahlen wären. Der Takt 80 pr. Min. ist nämlich der schnellste, dessen Anwendung die Erfahrung als möglich erweist, wenn jede einzelne Partialarbeit ihre völlige Gröfse erlangen soll. Arbeitet man noch schneller, so wird es geradezu unmöglich, mit voller Kraft zu arbeiten, man mufs sich überhasten. Dies gilt natürlich nur von der Bewegung, die am hier angewandten Ergographen ausgeführt wird; wäre es z. B. nur ein einzelner Finger, der gebeugt werden sollte, so liefse die Arbeit sich möglicherweise schneller ausführen, und sollte der ganze Arm maximale Kontraktionen unternehmen, so würde dies ganz gewifs längere Zeit beanspruchen. Wie die Verhältnisse aber bei den hier betrachteten Ergogrammen vorlagen, erhält die Gröfse F eine gewisse absolute Bedeutung, nämlich als die Länge des Zeitraumes zwischen den Partialarbeiten, mit dem möglichst kurzen Zeitraum als Einheit gemessen. Offenbar ist es diese Gröfse, als deren Funktion sich unsere Konstanten erweisen müssen.

Tab. 32.

pr. Min.	F	D	q	$\frac{q}{c_2}$	c_2	q_2	$\frac{q_2}{c_2}$	c_2 ber.	f
80	1	25/9	2410	5,205	463	4010	8,661	459	+ 4
40	2	19/9	2749	5,327	516	4607	8,928	500	+ 16
20	4	27/9	3269	5,156	634	5444	8,587	660	— 26
10	8	1/10	5924	4,532	1307	9599	7,620	1302	+ 5

Nach F ist das Datum der Ausführung der einzelnen Ergogramme angegeben, was sich sogleich als nicht ohne Bedeutung zeigen wird. Darauf folgen die Konstanten q, c_2 und q_2, ferner die Brüche q/c_2 und q_2/c_2, die sich als annähernd konstant erweisen. Dafs sie nicht

völlig konstant sind, ist zweifelsohne eine Folge der zu- oder abnehmenden Übung, denn die Tabelle zeigt, dafs die beiden Brüche für das zuerst (d. 19/9) ausgeführte Ergogramm am gröfsten sind, und dafs sie darauf gerade in der Ordnung, in welcher die Ergogramme entstanden, abnehmen. Da die Variation keine grofse ist, leidet es wohl keinen Zweifel, dafs wir diese Brüche konstant finden würden, wenn es möglich wäre, den Einflufs der Übung gänzlich zu eliminieren. Setzt man daher $q/c_2 = q_5$ und $q_2/c_2 = q_6$, und werden die faktisch vorkommenden Vorzeichen eingeführt, damit man mit positiven Konstanten rechnen kann, so kann man Gleich. 51 in die Form:

$$A = c_2 \left[q_5 - \log.(R+y) - q_6 \log.[q_1 - \log.(R+y)] \right] \ldots \text{(Gl. 53)}$$

bringen, wo q_5 und q_6 von dem Zeitraume zwischen den Partialarbeiten unabhängig sind. Wir haben folglich nur zu untersuchen, wie c_2 mit diesem Zeitraum variiert. Die Werte von c_2 in der Tab. 32 zeigen nun keine augenfällige Gesetzmäfsigkeit, wir können aber sehr leicht folgern, wie c_2 mit F variieren mufs. Denn die Zeit zwischen den Partialarbeiten kann, wie S. 141—42 erwähnt, nur auf die Weise Einflufs auf die Gröfse der Arbeit erhalten, dafs der Stoffwechsel den Verbrauch mehr oder weniger vollständig ersetzt. Werden nun in einem Falle pr. Min. a, in einem anderen Falle 2a Partialarbeiten ausgeführt, so wird im letzteren Falle der Verbrauch doppelt so grofs als im ersteren, und überdies wird der Stoffwechsel nach jeder Partialarbeit nur halb so lange wirken können. Wird die Anzahl der Partialarbeiten pr. Min. also doppelt so grofs, so kann die durch den Stoffwechsel bewirkte Restitution nur 1/4 werden u. s. w. Mit anderen Worten: die Arbeit mufs mit dem Quadrate des F, des Zeitraumes zwischen den Partialarbeiten, zunehmen. Man mufs daher finden:

$$c_2 = q_7 + q_8 \cdot F^2 \quad \ldots \text{(Gleich. 54).}$$

Werden die wahrscheinlichen Werte von q_7 und q_8 bestimmt, so erhält man:

$$c_2 = 446 + 13{,}37\, F^2.$$

Setzt man hier successiv die Werte von F ein und berechnet man die entsprechenden Gröfsen für c_2, so bekommt man die unter »ber. c_2« angegebenen Gröfsen.

Da die Abweichungen f der letzteren von den gefundenen c_2 nicht gröſser sind, als sich unter Berücksichtigung der weniger genauen Weise, wie c_2 bestimmt wurde, erwarten lieſs, so muſs Gleich. 54 als richtig betrachtet werden. Setzt man diesen Ausdruck in Gleich. 53 ein, so erhält man für das Arbeitsgesetz die vollständige Form:

$$A = (q_7 + q_8 \cdot F^2) \left[q_5 - \log.(R + y) - q_6 \log.[q_1 - \log.(R + y)] \right] \quad \ldots . \text{(Gleich. 55)}.$$

Es wird sich im Folgenden erweisen, daſs diese Formel nicht so gänzlich alles psychologischen Interesses entbehrt, wie es vorläufig scheinen könnte. Bevor wir zur näheren Erwägung dieser mehr theoretischen Frage schreiten, erübrigt es noch, die Bedeutung der Übung für die Muskelthätigkeit in Kürze zu erörtern.

Der Einfluſs der Übung. Im Vorhergehenden konnten wir nicht umhin, an verschiedenen Punkten die Übung zu berücksichtigen, weil diese bei der Untersuchung der Wirkung anderer Faktoren leicht störend hinzutritt. Es könnte deshalb auch als recht natürlich erscheinen, wenn wir damit angefangen hätten, den Einfluſs der Übung zu bestimmen, um denselben, wo er störend eingreift, um so leichter eliminieren zu können. Dies betrachtete ich indes als überflüssig, weil die Bedeutung der Übung für die Muskelthätigkeit aus dem täglichen Leben so wohlbekannt ist, daſs spezielle Untersuchungen hierüber nicht nötig sind. Wir wissen, daſs die Muskeln durch Übung in einer bestimmten Arbeit nicht nur kräftiger werden, so daſs durch eine einzelne maximale Anstrengung eine gröſsere Arbeitsmenge geliefert werden kann, sondern auch, daſs sie zugleich schwieriger ermüden, so daſs die Arbeit längere Zeit hindurch fortgesetzt werden kann. Dies wird durch die zahlreichen, bereits vorliegenden ergographischen Untersuchungen denn auch völlig bestätigt, und bedeutende neue Resultate werden auf diesem Gebiete wohl kaum zu erzielen sein. Die hier vorliegenden Untersuchungen zeigen nun auch, wie zu erwarten stand, weder mehr noch weniger. Nehmen wir, für eine bestimmte V-P, Ergogramme, die zu verschiedenen Zeiten in demselben Takte ausgeführt wurden, so er-

weist es sich, dafs diese bei wachsender Übung sowohl höher als länger werden. Beispielsweise wählen wir drei von A. L. beim Takte 40 pr. Min. ausgeführte Ergogramme, Pl. XVI, B, d. 8/2, Pl. XI, B, d. 21/2, Pl. XIII, C, d. 6/5. Diese sind im Pl. VIII, B wiedergegeben, und die Figur zeigt deutlich, wie die Ergogramme im Laufe der Zeit sowohl an Höhe als Länge bedeutend zunehmen. Z. B. bietet das erste Ergogramm (8/2), wo die Partialarbeiten nicht höher als 4,3 cm-K. reichen und deren ganze Anzahl 70 beträgt, eine nicht unbedeutende Verschiedenheit vom letzten Ergogramme (6/5) dar, das mit einer Arbeit von 6,2 cm-K. anfängt und mehr als 180 Partialarbeiten umfafst.

Bekanntlich genügt es nicht, sich geübt zu haben, man mufs mit dem Üben fortfahren, sonst verliert man die gewonnene Geschicklichkeit wieder. Auch dies geht aus Pl. VIII hervor, wo noch ein viertes, durch die punktierte Linie angegebenes Ergogramm eingezeichnet ist. Letzteres wurde d. 19/9 ausgeführt und ist das erste, das von der genannten V-P geliefert wurde, nachdem die Versuche mehr als 4 Monate hindurch eingestellt gewesen waren. Im Vergleich mit dem Ergogramm vom 6/5 erweist dasselbe sich sowohl weniger hoch als lang; in beiden Richtungen hat also ein Verlust stattgefunden. Man mufs sich »trainiert« haben, um das möglichste leisten zu können.

Neue Erfahrungen hinsichtlich des Einflusses der Übung vermögen unsere Versuche also nicht zu bringen. Dagegen scheinen sie einen nicht unwesentlichen Beitrag zu geben, um verstehen zu können, worauf dieser Einflufs beruht. Bisher war man zu der Ansicht geneigt, die Höhe der Partialarbeiten werde vorzüglich durch den Zustand des Muskels bestimmt, während deren Anzahl wesentlich durch den Zustand des Zentralorganes bedingt sei[1]. Mit Bezug auf ersteren Punkt habe ich nichts zu bemerken. Alle Erfahrungen deuten darauf hin, dafs die Verringerung der Partialarbeiten während der Ermüdung eine periphere Erscheinung ist,

[1] Vgl. die gute Übersicht über die hierhergehörenden Thatsachen in Hoch und Kraepelin: Über die Wirkung der Theebestandteile u. s. w. Kraepelin: Psychologische Arbeiten. I. S. 467 u. f.

die der Anhäufung von »Ermüdungsstoffen« im Muskel ihr Entstehen verdankt. Die durch Übung bewirkte Zunahme der Gröfse der Partialarbeiten läfst sich ebenfalls als eine natürliche Folge davon verstehen, dafs der Muskel bei fortwährendem, nicht überanstrengendem Gebrauche wächst. Was dagegen die Bedeutung des Zentralorgans für die Anzahl der Partialarbeiten betrifft, bin ich weniger geneigt, dieselbe als entschieden zu betrachten. Dafs zentrale Erscheinungen hier eine Rolle spielen können, steht aufser Zweifel; die schmerzhafte Ermüdung, die mit dem jähen Abschlufs der begrenzten Ergogramme in Verbindung steht, ist ja jedenfalls eine psychische Erscheinung, die als solche zentrale Vorgänge erfordert. Wir sahen aber im Vorhergehenden, dafs der Stoffwechsel sehr wesentlichen Einflufs auf die Anzahl der Partialarbeiten übt. Je langsamer der Takt ist, in welchem gearbeitet wird, um so weniger sinken die Partialarbeiten, und um so länger wird die Thätigkeit fortgesetzt werden können, bis die Partialarbeiten, praktisch genommen, den Wert Null erhalten. Also je länger der Stoffwechsel wirken kann, um so mehr nimmt die Anzahl der Partialarbeiten zu, und bei künstlicher Hemmung des Stoffwechsels nimmt deren Anzahl stark ab. Es leuchtet daher ein, dafs eine Zunahme sich ebenfalls erreichen liefse, wenn der Stoffwechsel auf irgend eine Art lebhafter würde, so dafs sich während einer gegebenen Zeit eine völlige Wiederherstellung erzeugen liefse. Gerade dies wird aber zweifelsohne durch fortwährende Übung erzielt. Ein arbeitender Muskel wird, wie wir wissen, besser ernährt als ein ruhender: der Blutzuflufs ist stärker, die Gefäfse sind beträchtlich erweitert. Wird nun dieselbe Arbeit unablässig geübt, so scheint die Erweiterung der Gefäfse zum Teil andauernd zu werden; hierauf deutet wenigstens die Geschwindigkeit hin, mit welcher eine bisher nicht viel benutzte Muskelgruppe anschwellen kann, wenn sie in stetige Thätigkeit kommt. Die gröfsere Weite der Gefäfse bewirkt die Möglichkeit besserer Ernährung, die dann wieder zur Folge hat, dafs der Muskel weniger schnell ermüdet, d. h., dafs die Anzahl der Partialarbeiten zunimmt. Diese rein peripherische Ursache, weshalb die Länge der Ergo-

gramme mit der Übung wächst, scheint mir jedenfalls ebenso wohlbegründet als die gewöhnlich angenommene zentrale, selbst wenn man natürlich nicht geradezu bestreiten kann, dafs auch die Arbeitsfähigkeit der motorischen Zentren durch Übung entwickelt wird.

DIE PHYSIOLOGISCHE BEDEUTUNG DER MASSFORMEL.

Unsere Untersuchungen haben jetzt einen Punkt erreicht, an welchem die Frage sich von selbst einstellt: was bedeuten alle diese Formeln? Empirisch festgestellte Formeln können allerdings an und für sich Wert besitzen, insofern nämlich jemand Interesse daran haben möchte, die Erscheinungen oder Verhältnisse, für die sie gültig sind, zu berechnen. Derartiges praktisches Interesse werden unsere Formeln aber wohl schwerlich jemals erregen; ihre Bedeutung ist ausschliefslich theoretischer Natur. Wert besitzen sie nur, insofern wir aus ihnen zu folgern vermögen, was das für Kräfte sind, die thätig waren. Deshalb erhebt sich die unabweisbare Frage: was bedeuten diese Formeln, für welche physischen, physiologischen oder psychischen Prozesse sind die gefundenen Quantitätsrelationen gültig?

Alle unsere Formeln sind, wie wir sahen, einer gemeinschaftlichen Wurzel entsprossen, lassen sich auf eine und dieselbe Grundform zurückführen, auf die »korrigierte Mafsformel«:

$$E = c_1 \cdot D_m = c_2 \log. \left[\frac{R}{R_0}(a - a_1 \log. R)\right] \quad . \; . \; . \; . \text{ (Gleich. 40).}$$

Zu dieser Gleichung gelangten wir, indem wir auf theoretischem Wege einen Ausdruck für die Gröfse der photochemischen Wirkung suchten, welche Licht von gegebener Intensität R in der Netzhaut hervorzubringen vermag; D_m in Gleich. 40 bezeichnet gerade die maximale Tiefe, bis zu der diese Wirkung eindringen kann. Hierauf nahmen wir an, dafs die hervorgerufene

Empfindung *E* der maximalen Tiefe der photochemischen Wirkung proportional sei. Von dieser Voraussetzung aus waren wir im stande, einen Ausdruck für das Verhältnis zwischen zwei Reizen zu berechnen, die einen ebenmerklichen Empfindungsunterschied hervorrufen. Bei dieser Berechnung war natürlich der Kontrast und der wahrscheinliche Einflufs gleichzeitiger Reize auf den Stoffwechsel zu berücksichtigen; indem wir aber diese Rücksichten nahmen, gelangten wir gerade zu dem auf einem ganz anderen Wege empirisch gefundenen »Unterscheidungsgesetze«. Mithin schien also die Voraussetzung: die Empfindung ist der Tiefe der photochemischen Wirkung proportional, berechtigt zu sein. Die Möglichkeit läfst sich aber offenbar nicht ausschliefsen, dafs das richtige Ergebnis auf einem Zufall beruhen könnte; es wäre sehr wohl denkbar, dafs es einen anderen physiologischen Prozefs gäbe, der ebenso wie die photochemische Wirkung durch log. *R* bestimmt wäre, und dafs die Empfindung eben diesem anderen, unbekannten Prozesse proportional anwüchse. In einem solchen Falle mufs man ganz gewifs zu dem richtigen quantitativen Ausdruck gelangen, selbst wenn man von der falschen Annahme ausgeht.

Ganz unwahrscheinlich ist es jedoch nicht, dafs der Nervenprozefs von der Tiefe der photochemischen Wirkung abhängig wäre. Jedenfalls ist es eine bekannte Sache, dafs in dem durch einen konstanten elektrischen Strom gereizten Nerv die Wirkung innerhalb gewisser Grenzen mit der Länge der zwischen den Elektroden liegenden Strecke des Nervs zunimmt. Dieser Thatsache scheint unsere Annahme ganz analog zu sein. Je tiefer die durch das Licht verursachte chemische Umbildung in die empfindlichen Elemente der Netzhaut eindringt, um so gröfser mufs, wie anzunehmen, die ausgelöste Nerventhätigkeit werden, und mit dieser ist wieder der Energieumsatz im Zentralorgan und somit die Empfindung proportional. Die Annahme einer Proportionalität zwischen der Empfindung und der Tiefe der photochemischen Wirkung ist also keineswegs ganz unbegründet; wie wir sehen, kann sie sich auf eine analoge, experimentell festgestellte Thatsache stützen.

Hieraus folgt indes noch nicht, dafs die Annahme

richtig ist. Aus der »Mafsformel« leiteten wir nicht nur das Unterscheidungsgesetz für Lichtempfindungen ab, sondern auch das entsprechende Gesetz für Schallempfindungen. Letzteres wird etwas weniger kompliziert als ersteres, teils weil successive Schallreize keine Kontrastwirkung hervorrufen, und teils weil der Stoffverbrauch bei adäquater Reizung des Nervus acusticus der Erfahrung nach ein so geringer ist, dafs man den Einflufs des Stoffwechsels auf den Nervenprozefs nicht mit in Anschlag zu bringen braucht. Das Grundverhältnis zwischen dem Reize und dem hervorgerufenen psychophysiologischen Prozesse ist aber für beide Sinnesgebiete dasselbe. Da nun die Reizung des Hörnervs durch keine photochemischen Wirkungen bedingt ist, mufs es offenbar einen anderen physiologischen Prozefs geben, der ebenfalls in logarithmischem Abhängigkeitsverhältnisse zum Reize steht. Auf Grundlage unserer gegenwärtigen Kenntnis von dem Bau der Nerven und der Natur der nervösen Prozesse scheint die Erklärung dessen, was hier vorgeht, denn auch nicht schwer zu sein.

Alles deutet darauf hin, dafs die durch Reizung eines Nervs hervorgerufene Thätigkeit elektrolytischer Natur ist. Von direkter Leitung eines elektrischen Stromes kann in einer halbflüssigen, nicht isolierten, aus leicht spaltbaren chemischen Stoffen bestehenden Masse wohl kaum die Rede sein. Die geringe Geschwindigkeit des »Nervenstroms« schliefst ebenfalls die Möglichkeit einer elektrischen Leitung derselben Art wie die eines metallischen Leiters aus. Die Bewegung im Nerv ist deshalb als eine von Strecke zu Strecke fortschreitende elektrolytische Umlagerung der Ionen aufzufassen. In einem durchaus gleichförmigen Elektrolyt wird eine solche Bewegung nicht zu stande kommen können; zwischen zwei sich berührenden Stellen ist ein Unterschied der Konzentration erforderlich. Wird dieser hergestellt, so entsteht hierdurch ein elektrischer Potentialunterschied, der nach Zustandekommen des Stromes Energie aus der Stelle mit höherer nach der Stelle mit niedrigerer Konzentration führen wird, bis der Unterschied der Konzentration aufgehoben ist. Von der Gröfse der auf diese Weise entstandenen elektromotorischen

Kraft wissen wir, dafs sie dem log. *(C/c)* proportional ist, indem *C* und *c* die Konzentration der beiden Stellen oder die hierdurch bestimmten osmotischen Drucke bezeichnen[1]. Von diesen Thatsachen aus scheint der Nervenprozefs sich ohne Schwierigkeit erklären zu lassen. Die Reizung eines peripheren Nervenendes spaltet die chemischen Verbindungen im Nerv; es entsteht hierdurch ein Konzentrationsunterschied zwischen der erregten Stelle und der unmittelbar anstofsenden Strecke, der einen Potentialunterschied herbeiführt. In einem leitenden Organ wie einem Nerv wird dieser Unterschied schwerlich ohne Ausladung der Elektrizität bestehen können, und es entsteht mithin ein elektrolytischer Strom. Die elektrische Ausladung geschieht wahrscheinlich eben zwischen den beiden Punkten, die einen Potentialunterschied bekommen haben. Die unter dem Namen des Elektrotonus bekannte Erscheinung, die sich an einem unorganischen Elektrolyte mit verschiedener Leitungsfähigkeit des Kerns und der Peripherie völlig nachahmen läfst[2], zeigt uns nämlich, dafs in einer Strecke eines Nervs gleichzeitig Ströme in entgegengesetzter Richtung verlaufen können. Folglich verwehrt uns nichts, in einem Nerv einen geschlossenen Stromkreis zwischen zwei aneinandergrenzenden Stellen anzunehmen, die einen Potentialunterschied haben. Wegen des elektrolytischen Stroms wird aber notwendigerweise die Konzentration an der zweiten Stelle vermindert, so dafs nun zwischen dieser und der dritten, näher am Zentrum gelegenen Stelle ein Potentialunterschied entsteht, u. s. w. Auf diese Weise mufs die Bewegung sich aus der erregten Stelle durch die ganze Nervenleitung hindurch bis ins Zentralorgan fortpflanzen. Und die Stärke dieses elektrolytischen Stromes wird offenbar durch den Potentialunterschied zwischen dem Zentralorgan und der erregten peripheren Stelle bestimmt werden, also von den Konzentrationen der bei-

[1] Ostwald: Grundrifs der allgemeinen Chemie. 3. Aufl. Leipzig 1899. S. 442 u. f. Nernst: Theoretische Chemie. 2. Aufl. Stuttgart 1898. S. 659 u. f.

[2] Gruenhagen: Lehrbuch der Physiologie. 7. Aufl. Hamburg 1885. Bd. I. S. 557 u. f.

den Punkte abhängig sein. Die Konzentration C im Zentralorgane kann als Konstante betrachtet werden, wegen der dort angehäuften Massen chemischer Energie. Die Konzentration c der erregten Nervenfaser wird selbstverständlich von dem Reize R abhängig, denn je stärker dieser ist, um so mehr Stoff wird in der Nervenfaser gespalten, und somit sinkt c. Ist c aber dem R umgekehrt proportional, so folgt hieraus also, dafs der Potentialunterschied zwischen dem Zentralorgan und der erregten Nervenfaser dem $\log. C \cdot R$ proportional wird. Die Stromstärke im Nerv und somit die im Zentralorgane hervorgerufene Bewegung werden also von $\log. R$ abhängig. Nimmt man nun an, dafs die Empfindung der im Zentralorgan ausgelösten Bewegung proportional ist, so wird die Empfindung in logarithmischem Abhängigkeitsverhältnisse zum Reize stehen müssen.

Hiermit sind wir indes noch nicht fertig. Wie das Verhältnis hier dargestellt wurde, wird es nur in einer von der Verbindung mit dem Organismus getrennten Nervenfaser stattfinden. Der normal funktionierende Nerv dagegen wird während seiner Thätigkeit genährt[1]. Durch den Stoffwechsel ändert sich offenbar die Konzentration des Stoffes im arbeitenden Nerv, weil die gebildeten Spaltungsprodukte entfernt werden und neuer Stoff sich einlagert. Welchen Einflufs dieser doppelte Prozefs auf die Konzentration und somit auf den Potentialunterschied im Nerv hat, läfst sich natürlich nicht ganz im allgemeinen entscheiden; es gibt die Möglichkeit sowohl einer Vergröfserung als einer Verminderung des Potentialunterschieds. Diese durch den Stoffwechsel bewirkte Veränderung des Potentialunterschieds kann aber nicht selbst als eine konstante Gröfse betrachtet werden. Wir wissen nämlich, dafs der Stoffwechsel in einem arbeitenden Organ gewöhnlich um so lebhafter vorgeht, je kräftiger das Organ arbeitet, und es ist wohl keine gar zu gewagte Annahme, dafs dies auch in einem arbeitenden Nerv stattfindet. Welches Gesetz diese Vergröfserung des Stoffwechsels befolgt, das

[1] Lenhossek: Der feinere Bau des Nervensystems. Berlin 1895. S. 109 u. f.

wissen wir einstweilen nicht, da die Thätigkeit des Nervs aber von der Stärke des Reizes abhängig ist, so mufs auch der mit der Thätigkeit anwachsende Stoffwechsel eine Funktion des Reizes sein. Wegen des Stoffwechsels wird der Potentialunterschied zwischen dem Zentralorgan und der erregten Nervenfaser also gewöhnlich nicht dem log. R proportional sein, sondern entweder geschwinder oder langsamer zunehmen. Diese durch den Stoffwechsel bedingte Abweichung ist indes, wie wir sahen, selbst eine Funktion von R; wir können also den Potentialunterschied proportional dem log. $[R \cdot \varphi(R)]$ setzen. Hier mufs $\varphi(R)$ so beschaffen sein, dafs die Gröfse je nach den Umständen mit wachsenden Werten von R ab- oder zunimmt. Gerade dies wird aber der Fall sein, sofern $\varphi(R) = a - a_1 \log. R$, was die Funktion ist, die wir empirisch als Ausdruck für den Einflufs des Stoffwechsels fanden. Ist a_1 positiv, so sieht man, dafs $\varphi(R)$ mit wachsenden Werten von R abnimmt; ist a_1 dagegen negativ, so wird $\varphi(R)$ mit R wachsen. Es braucht wohl kaum bemerkt zu werden, dafs es natürlich viele andere Funktionen von R geben kann, die je nach den Vorzeichen der vorkommenden Konstanten mit R zu- oder abnehmen werden; da die angeführte Funktion aber nicht nur unsere theoretischen Forderungen erfüllt, sondern sich auch zugleich als mit den Erfahrungen übereinstimmend erweist, liegt ja aller mögliche Grund vor, mit derselben zu rechnen. Unter Rücksichtnahme auf den Stoffwechsel erweist es sich also, dafs der Potentialunterschied zwischen den beiden Nervenenden dem log. $[R \cdot (a - a_1 \log. R)]$ proportional ist. Mit anderen Worten: es zeigt sich, dafs die Mafsformel ein Ausdruck für die elektromotorische Kraft ist, die die Stärke des Nervenprozesses und somit die im Zentralorgane hervorgerufene Veränderung bestimmt. Nehmen wir nun an, dafs die Empfindung derselben proportional ist, so folgen unsere Unterscheidungsgesetze mit logischer Notwendigkeit hieraus, und wir haben mithin deren rein physiologische Erklärung gewonnen.

Die hier durchgeführte Auslegung der Mafsformel ist von der Natur des Sinnesorganes unabhängig, indem sie sich ausschliefslich auf die allgemeinen physiolo-

gischen Verhältnisse der Nerven stützt und von speziellen Eigentümlichkeiten irgend eines Sinnesorgans keinen Gebrauch macht. Es scheint denn auch kein Grund für die Annahme vorzuliegen, daſs die Sache sich auf verschiedenen Sinnesgebieten verschieden verhalten sollte. Wir können also mit Bezug auf das Auge dieselbe Erklärung festhalten, die sich hinsichtlich aller anderen Sinnesorgane wird durchführen lassen, nämlich daſs es die dem Reize proportionale Menge zerteilter Verbindungen in den peripheren Nervenfasern ist, die für die Stärke des Nervenstroms und somit für den Energieumsatz im Zentralorgane bestimmend wird. Es ist nun auch leicht zu sehen, daſs zwischen dieser Auffassung und der früheren Ansicht, nach welcher die Tiefe der photochemischen Wirkung in der Netzhaut für den ausgelösten Nervenprozeſs bestimmend sein sollte, kein Mangel an Übereinstimmung ist. Denn mit der Menge des zersetzten Stoffes nimmt natürlich auch das Eindringen der Wirkung in die Tiefe zu, und da sowohl die Tiefe der Wirkung als die Stärke des ausgelösten Stroms von der Menge des zersetzten Stoffes logarithmisch abhängig ist, wird es ganz gleichgültig, welche dieser Gröſsen man zum Ausgangspunkte wählt. Unsere beiden anscheinend verschiedenen Erklärungen sind in der That also nur verschiedene Ausdrücke für eine und dieselbe Sache. Als Resultat dieser Betrachtungen können wir also feststellen:

Das durch die »Maſsformel« ausgedrückte Abhängigkeitsverhältnis zwischen Empfindung und Reiz hat rein physiologische Bedeutung, indem die Formel unmittelbar nur die Gröſse des Potentialunterschieds angibt, der zwischen dem Zentralorgan und der durch einen gegebenen Reiz erregten peripheren Nervenfaser entsteht. Diesem Potentialunterschiede wird die im Zentralorgan umgesetzte Energiemenge proportional. Die Annahme ist indes berechtigt, daſs die Empfindung dieser umgesetzten Energiemenge proportional ist, denn indem die Maſsformel hierdurch einen Ausdruck für die Abhängigkeit der Empfindung von dem Reize gibt,

kann man hieraus die auf verschiedenen Sinnesgebieten empirisch gültigen Unterscheidungsgesetze ableiten.

Wir schreiten nun zur Untersuchung der Bedeutung der Mafsformel für die Muskelarbeit. Im Vorhergehenden sahen wir, dafs wir nur nötig haben, in der Gleich. 40 statt E die Arbeitsmenge A zu setzen; die Formel wird dann der Ausdruck für die Gröfse der verrichteten Arbeit, indem zugleich R die Anzahl der Partialarbeiten bezeichnen wird. Dafs eine solche Übereinstimmung zwischen zwei ganz verschiedenen Gebieten kein Zufall sein kann, ist einleuchtend; sie mufs notwendigerweise auf gewissen gemeinschaftlichen Eigentümlichkeiten der arbeitenden Organe beruhen. Es ist ferner klar, dafs das »Arbeitsgesetz«, d. h. die Mafsformel als Ausdruck für die Gröfse der Arbeit, ein rein physiologisches Gesetz sein mufs, da es ausschliefslich die Abhängigkeit der Arbeit von der Anzahl der Partialarbeiten betrifft. Die psychische Anspannung, die Stärke der Innervation, kommt in der Formel gar nicht vor; diese hat offenbar mit psychischen Erscheinungen gar nichts zu thun. Da dasselbe Gesetz sich nun auch auf dem Gebiete der sinnlichen Wahrnehmung als gültig erweist, kann es wohl kaum bezweifelt werden, dafs es auch hier der Ausdruck für ein physiologisches Verhältnis ist. Die Übereinstimmung zwischen zwei so äufserst verschiedenen Gebieten dient daher als Beweis, dafs wir recht hatten, wenn wir unseren Unterscheidungsgesetzen eine rein physiologische Auslegung gaben.

Suchen wir nun zu einem Verständnisse der Bedeutung des Arbeitsgesetzes zu gelangen, so zeigt es sich sogleich, dafs dieses mehr als eine Deutung zuläfst. Weshalb werden die successiven Partialarbeiten nicht gleichgrofs? Das rührt von der Ermüdung her, diese kann ihren Sitz aber entweder im Zentralorgane haben, so dafs die successiven Muskelinnervationen abnehmen, oder auch im Muskel, so dafs dessen Kontraktionen immer mehr abnehmen, obgleich die Innervationen gleichgrofs sind. Endlich läfst es sich auch denken, dafs sowohl das Zentralorgan als der Muskel ermüdete, so dafs die abnehmende Gröfse der Partialarbeiten eine Wirkung dieser beiden vereinten Ursachen wäre. Eine

wahrscheinliche Erklärung des Arbeitsgesetzes erfordert vor allen Dingen, dafs wir darüber im reinen sind, wo wir die Ursache des im Gesetze gegebenen Verhältnisses zwischen der Arbeitsmenge und der Anzahl der Partialarbeiten zu suchen haben.

Gröfsere Schwierigkeit kann dieses Problem uns indes nicht bereiten. Alle Erfahrungen deuten darauf hin, dafs das Zentralorgan nicht ermüden kann, wenigstens nicht bei derartiger Arbeit. Die maximalen motorischen Innervationen werden deshalb gleichgrofs. Dagegen wird der grofse Stoffverbrauch im Muskel, den der gleichzeitig vorgehende Stoffwechsel nicht zu kompensieren vermag, zur Folge haben, dafs sich »Ermüdungsstoffe« anhäufen, welche die Arbeit des Muskels hemmen. Bei fortgesetzter Thätigkeit nimmt deshalb die vom Muskel geleistete Arbeit immer mehr ab, obschon die Innervationen konstante Gröfse haben. Wir haben keinen besonderen Anlafs, uns näher auf die zahlreichen und verschiedenartigen Erfahrungen einzulassen, welche diese Auffassung des Einflusses der Ermüdung auf die Muskelarbeit herbeigeführt haben; eine gewifs vollständige Übersicht über die hierher gehörenden Beobachtungen und Versuche gab G. E. Müller[1]. Der Genauigkeit halber mufs jedoch sogleich bemerkt werden, wie diese Auffassung, dafs die durch Ermüdung bewirkte Verminderung der Arbeit von einer im Muskel thätigen Ursache herrührt, sich nur so lange behaupten läfst, bis eine schmerzhafte Empfindung der Ermüdung hervorgerufen wird. Die von diesem Augenblick an eintretende fernere Verminderung der Arbeitszuwächse (vgl. Gleich. 52) rührt nachweisbar von einer zentral wirkenden Ursache her. Da wir dieses Verhältnis aber erst an einem späteren Punkte unserer Untersuchungen genau erklären können, sehen wir vorläufig ganz hiervon ab und berücksichtigen nur diejenige Form des Arbeitsgesetzes, welche für die unbegrenzten und den ersten Teil der begrenzten Ergogramme gültig ist. Es ist also Gleich. 55:

$$A = (q_7 + q_8 \cdot F^2) \left[q_5 - \log.(R + y) - q_6 \log.\left[q_1 - \log.(R + y)\right] \right]$$

[1] Zur Psychophysik der Gesichtsempfindungen. Zeitschr. f. Psych. u. Phys. Bd. 14. S. 46 u. f.

deren Bedeutung wir hier zum Gegenstand unserer Untersuchung machen, und von der wir dem Obigen zufolge annehmen dürfen, dafs sie ein Ausdruck für die nur im Muskel thätigen Kräfte ist.

Gleich. 55 ist zum Teil, wie wir wissen, nur eine Umschreibung der Mafsformel, die wir aus praktischen Gründen zu unternehmen gezwungen waren, um es überhaupt zu ermöglichen, die Gültigkeit des Gesetzes für die vorliegenden Messungen zu prüfen, zum Teil aber auch eine Erweiterung. Um die remanente Ermüdung bei der Berechnung mitnehmen zu können, erwies es sich als notwendig, den Addenden y einzuführen; ferner kommt in der Gleich. 55 der Faktor $(q_7 + q_8 \cdot F^2)$ vor, dessen Bedeutung ebenfalls schon früher völlig erklärt wurde. Wir sahen (S. 175), dafs die verrichtete Arbeit um so gröfser wird, je längere Zeit der Muskel zur Ruhe zwischen den einzelnen Partialarbeiten erhält. Dies ist eine Folge des Stoffwechsels, der den Verbrauch um so besser kompensiert, je länger er zu wirken vermag, bis eine neue Arbeit neuen Verbrauch erfordert. Von dieser Voraussetzung aus fanden wir, dafs die Arbeit mit dem Quadrate der Zeit wachsen müsse, was sich als mit der Erfahrung übereinstimmend erwies und deshalb als der Faktor $q_7 + q_8 \cdot F^2$ in die Formel aufgenommen wurde. Für einen gegebenen Takt, also für einen konstanten Wert von F, wird $q_7 + q_8 \cdot F^2 = c_2$, so dafs dieses Glied hinsichtlich jedes gegebenen Ergogrammes nur als konstanter Faktor auftritt, von dem wir folglich durchaus absehen können. Zurück bleibt also nur der Ausdruck:

$$q_5 - \log. R - q_6 \log. (q_1 - \log. R) = q_5 - \log. [R \cdot (q_1 - \log. R)^{q_6}],$$

um dessen Erklärung es sich handelt.

Indem ich es nun versuche, diese Aufgabe zu lösen, mufs ich doch sofort gestehen, dafs ich mich nicht im stande sehe, eine so durchgeführte Erklärung zu liefern, wie die oben von der Bedeutung der Mafsformel auf dem Gebiete der sinnlichen Wahrnehmung gegebene. Während die Natur der Nerventhätigkeit schon so gut aufgeklärt zu sein scheint, dafs wir ohne besondere hypothetische Annahmen die Mafsformel aus bekannten

physischen und physiologischen Thatsachen abzuleiten vermochten, ist die Art und Weise, wie die kontraktile Muskelsubstanz ihre eigentümlichen Wirkungen hervorbringt, an vielen wesentlichen Punkten noch ganz unaufgeklärt. Eine völlig befriedigende Auseinandersetzung zu geben bin ich deshalb nicht im stande; ich kann nur andeuten, wie ich »mir die Sache denke«.

Wegen der grofsen Übereinstimmung der elektrischen Verhältnisse des Muskels mit denen des Nervs haben wir Grund, zu vermuten, dafs in beiden diesen Organen durch Erregungen gleichartige Wirkungen hervorgerufen werden, von den dem Muskel eigentümlichen Kontraktionen natürlich abgesehen. Wird der Muskel durch seinen motorischen Nerv gereizt, so findet eine Veränderung des Gewebes statt, und die gereizte Stelle wird im Verhältnisse zu den nichtangegriffenen Stellen negativ elektrisch. Diese Thatsache zeigt, dafs also auch durch Reizungen des Muskels ein Potentialunterschied hervorgerufen wird, der ohne Zweifel die Bedingung für die Kontraktion des Muskels ist. Bei maximaler Innervation erreicht dieser Potentialunterschied eine durch den log. (C/c) bestimmte Gröfse, indem c und C ebenso wie beim Nerv die osmotischen Drucke an dem gereizten Punkte des Muskels und in der übrigen Muskelmasse bezeichnen. Von dem Stoffwechsel und von allen anderen Faktoren, die auf den Potentialunterschied im Muskel Einflufs haben mögen, sehen wir nun einstweilen ab. Jede Wiederholung der maximalen Innervation des Muskels wird alsdann denselben Stoffumsatz in der erregten Stelle des Muskels herbeiführen, und nach R Innervationen mufs der osmotische Druck folglich hier bis auf c/R gesunken sein. Hierdurch wird der Potentialunterschied im Muskel bis log. (RC/c) angewachsen sein, oder mit anderen Worten: der Potentialunterschied wächst logarithmisch mit der Anzahl der Innervationen. Der fortwährenden Vergröfserung des Potentialunterschieds wirkt nun der Stoffwechsel entgegen, dessen Einflufs ebenso wie beim Nerv mit R wachsen mufs. Die Folge hiervon wird, dafs der Potentialunterschied langsamer zunimmt als log. R; wird stets die Analogie mit dem Nerv festgehalten, so läfst sich annehmen, dafs er einer Gröfse von der Form:

$$\log. \left[\frac{R\,C}{c}\,(q_1 - \log. R)\right]$$

proportional ist.

Nun kommt indes ein ganz anderer Umstand in Betracht, dem nichts Ähnliches beim Nerv entspricht, der aber beim Muskel weitaus den gröfsten Einflufs zeigt. Durch Reizung eines Sinnesnervs wird im Gehirn ein Energieumsatz hervorgerufen, dieser mag aber im Verhältnis zur grofsen potentiellen Energie des Gehirns als verschwindend klein betrachtet werden. Deshalb konnten wir im Ausdrucke für den Potentialunterschied des Nervs C als eine konstante Gröfse betrachten, und der Potentialunterschied erwies sich also als nur von R abhängig. Beim Muskel verhält es sich ganz anders. Der maximal erregte Muskel verrichtet eine bedeutende mechanische Arbeit, die nur auf Kosten der potentiellen Energie des Muskels geleistet werden kann. Es geht also ein Stoffumsatz vor, weshalb C abnehmen mufs; nach welchem Gesetze dies aber geschieht, läfst sich vorläufig wohl unmöglich angeben. Das Verhältnis mufs ein ziemlich kompliziertes sein, weil die Verminderung von C nicht direkt von der Anzahl der Muskelkontraktionen, sondern von der hierdurch geleisteten Arbeit abhängig ist, die für die successiven Kontraktionen nicht die gleiche Gröfse hat. Hierzu kommt ferner, dafs auch der Stoffwechsel auf C Einflufs erhält, indem die Ablagerung neuen Stoffes diese Gröfse vermehren mufs. Alle diese Faktoren in die Berechnung aufzunehmen, ist offenbar ganz unmöglich; einstweilen können wir weiter nichts über die Sache sagen, als dafs unser empirisch gefundenes Arbeitsgesetz darauf hindeutet, dafs der Potentialunterschied nach einer Anzahl von R Kontraktionen dem $\log. [R \cdot (q_1 - \log. R)^{q_6}]$ proportional ist. Es erweist sich nun empirisch, dafs diese Gröfse für alle Ergogramme abnimmt, wenn R wächst. Hieraus geht also hervor, dafs die potentielle Energie des Muskels, die wegen der verrichteten mechanischen Arbeit stets abnimmt, den wesentlichsten Einflufs darauf übt, wie grofs der Potentialunterschied des Muskels bei einer neuen Innervation werden kann. Der der Gröfse $\log. [R \cdot (q_1 - \log. R)^{q_6}]$ proportionale Potentialunterschied wird also zunächst das Mafs für die im Muskel übrig-

bleibende potentielle Energie. Folglich mufs die zur Verrichtung der mechanischen Arbeit verbrauchte Energiemenge die ursprüngliche, konstante Energie des Muskels minus der übrigbleibenden Energiemenge werden. Als Ausdruck für die verrichtete Arbeit erhält man also eine Gröfse von der Form:

$$A = c_2 \left[q_5 - \log. \left[R \cdot (q_1 - \log. R)^{q_6} \right] \right].$$

Dies ist aber gerade das Arbeitsgesetz, das in der That also nur besagt: die verrichtete Arbeit ist proportional dem Verluste des Muskels an potentieller Energie. Die Richtigkeit dieses Satzes läfst sich schwerlich bestreiten. Ebenfalls ist es verständlich, dafs man die verrichtete Arbeit nicht ohne weiteres gleich der Energieverminderung setzen kann, was seinen Grund natürlich darin findet, dafs der Muskel ebensowenig wie irgend eine andere Maschine vollen Nutzeffekt zu geben im stande ist; ein Teil der umgesetzten Energie geht ganz gewifs in der Form von Wärme, durch Überwindung verschiedener Hindernisse u. s. w. verloren.

Enthält diese Darstellung nun auch nicht so wenig Hypothetisches, so verbürgt uns anderseits das unbestreitbare Resultat, zu dem unsere Betrachtungen uns führten, dafs wir uns nicht weit von der Wahrheit entfernt haben können. Selbst wenn es uns also aus guten Gründen nicht gelungen ist, die im arbeitenden Muskel verlaufenden Prozesse genau auseinanderzusetzen, können wir doch folgendes feststellen:

Das Arbeitsgesetz, welches das Verhältnis zwischen der Anzahl der Partialarbeiten und der Gröfse der hierdurch verrichteten Arbeit angibt, ist nur eine spezielle Form für das Gesetz von der Erhaltung der Energie, indem es aussagt, dafs die verrichtete Arbeit dem Verlust des Muskels an potentieller Energie proportional ist.

DER EINFLUSS DER BEWUSSTSEINS-ZUSTÄNDE AUF DIE MUSKELARBEIT.

Psychische Zustände und Thätigkeiten. Unsere vorhergehenden Untersuchungen bewogen uns zu einer, wie es scheint, wohlbegründeten Auffassung des Verhältnisses zwischen den psychischen Zuständen und den körperlichen Veränderungen, an welche dieselben unmittelbar gebunden sind: es ist anzunehmen, daſs die Empfindung der im Zentralorgan umgesetzten Energiemenge proportional ist. Unter dieser Voraussetzung muſs es, wie in der Einleitung nachgewiesen, möglich sein, auch für solche Bewuſstseinserscheinungen, die nicht durch Sinnesreize hervorgerufen werden, die physischen Äquivalente zu bestimmen, wenn anders die seiner Zeit von Loeb und Féré angestellten Versuche nicht durchaus miſsweisend sind. Wir kommen nun zu dem eigentlichen Kern, dem Hauptpunkt unserer Untersuchungen: zu einer weiteren und genaueren Durchführung der genannten Versuche, um hierdurch zu brauchbaren quantitativen Bestimmungen zu gelangen. Es läſst sich nämlich durchaus nicht behaupten, daſs dies durch die bis jetzt vorliegenden, zerstreuten und ziemlich zweifelhaften Versuche erreicht wäre.

Bevor wir indes zur experimentellen Lösung der Aufgabe schreiten, wird es zweckmäſsig sein, zu erwägen, in welchem Umfange dieselbe sich wahrscheinlich lösen läſst. Verschiedene fruchtlose Bemühungen können möglicherweise erspart werden, wenn man von vornherein damit im reinen ist, in welchen Fällen positive Resultate zu erreichen sind und in welchen nicht. Es leuchtet nun ein, daſs nur dann die Rede davon sein kann, für eine psychische Erscheinung ein physisches Maſs zu finden, wenn sie überhaupt mit dem Energieumsatze im Gehirn in Verbindung steht, mit demselben verknüpft ist. Alle »transcendenten« psychischen Kräfte und Thätigkeiten, alle dergleichen psychischen Erscheinungen, die gar nicht von materiellen Bedingungen abhängig sind, müssen der Natur der Sache zufolge jedem Versuche, für sie ein physisches Maſs zu finden, Trotz

bieten. Es wird also ganz praktisch sein, wenn wir vorher zu entscheiden suchen, welche psychischen Erscheinungen wahrscheinlich dieser Art sind.

Diese Frage wurde in einer gediegenen Abhandlung: »Psychische Arbeit« von Höfler eingehend behandelt[1]. Allerdings hat die Abhandlung ihre Bedeutung wesentlich in der Konsequenz, mit welcher der Verfasser eine, meiner Ansicht nach, grundfalsche Auffassung durchgeführt hat, da Höfler mit dieser Auffassung aber gewiſs nicht allein steht, müssen wir uns mit derselben abfinden, und diese Arbeit wird freilich durch die konsequente Durchführung sehr erleichtert. Der Verf. weist erst nach, daſs der Ausdruck »psychische Arbeit« nicht schlecht und recht eine aus der physischen Welt entlehnte Redensart ist, daſs man dagegen die psychische Arbeit mit gutem Recht als der körperlichen parallel betrachten kann. Wie die Gröſse der körperlichen Arbeit durch das Produkt des Widerstands und des Weges, längs dessen der Widerstand überwunden wurde, gemessen wird, so wird dasselbe mit der psychischen Arbeit der Fall sein. Bei der Addition von Zahlenreihen z. B. bezweifelt niemand, daſs die Arbeit um so gröſser wird, je länger die Zahlenreihe ist, und die Summation wird um so mehr Mühe kosten, je weniger man darin geübt ist; dem Ungeübten wird die Arbeit daher viel gröſser als dem Geübten. Die Frage ist nun, welche psychischen Erscheinungen speziell das Gepräge geistiger Arbeit tragen. Die Antwort hierauf lautet, daſs Vorstellungen und Gefühle Zustände, Urteile und Begierden dagegen Thätigkeiten, Arbeit sind. Soweit kann man dem Verf. jedenfalls gern recht geben. Da nun jede Arbeit eine Kraft voraussetzt, welche die gegebenen Widerstände überwindet, so müssen den beiden Hauptformen psychischer Arbeit also auch zwei Kräfte entsprechen: die Urteilskraft und der Wille. Es wird nun ferner entwickelt, wie die Vorstellungen sich als Massen betrachten lassen, auf welche die Urteilskraft wirkt, und der Verf. macht sich das Vergnügen, die Begriffe der physischen Mechanik recht eingehend an diesen psychischen Verhältnissen durchzuführen. Dergleichen

[1] Zeitschrift für Psych. u. Physiol. Bd. 8. S. 44 u. 161.

kann der Abwechselung halber natürlich ganz unterhaltend sein, es ist mir aber nicht klar, was eigentlich dadurch gewonnen wird, dafs man von der Bewegung der Vorstellungen im psychischen Kraftfelde, von geistigen Niveauflächen u. s. w. redet. Für alle diejenigen Verhältnisse, die hier eintreten können, und auf die sich die Bezeichnungen der Mechanik übertragen lassen, hat die Psychologie seit langem ihre eigne festgestellte Terminologie. Die ganze Entwickelung macht daher zunächst den Eindruck eines übrigens ziemlich harmlosen Spieles mit Worten. — Schliefslich stellt der Verf. die Frage auf: »Gehen psychische und physiologische Arbeit dermafsen parallel, dafs überall, wo letztere geleistet wird, auch erstere als geleistet wahrgenommen werden kann, und umgekehrt?« Dies mufs natürlich verneint werden, denn wir können doch nicht umhin, anzunehmen, dafs Empfindungen und Vorstellungen, die eben keine psychischen Arbeiten sind, an Energieveränderungen im Gehirn gebunden sind. Welches Verhältnis man sich nun übrigens als zwischen den eigentlichen »psychischen Kräften« und den materiellen Veränderungen bestehend zu denken habe, darüber läfst der Verf. uns in einer gewissen Unsicherheit schweben. Aus seiner weiteren Entwickelung[1] scheint jedoch hervorzugehen, dafs er am meisten geneigt ist, die psychischen Kräfte als von allen materiellen Veränderungen unabhängig zu betrachten.

Wie Höfler die Sache dargestellt hat, kann es sich vielleicht verhalten; ist es aber wirklich notwendig, anzunehmen, dafs jede Hauptform psychischer Arbeit auch eine spezielle psychische »Kraft« voraussetze? Ist dies der Fall, so müssen wir die vollen Konsequenzen nehmen, und in dieser Beziehung ist es nun ziemlich unglücklich, dafs Höfler trotz aller Gründlichkeit dennoch nicht alles mitbekommen hat. Dies gilt z. B. vom Auswendiglernen, dessen Charakter als psychische Arbeit der Verf. geradezu bestreiten zu wollen scheint. Etwas auswendig lernen ist doch ganz unbestreitbar eine Arbeit, obendrein vielleicht eine der am allermeisten anstrengenden psychischen Arbeiten, welche viele, besonders ältere

---

[1] Cit. Ort. S. 225—26; Sep.-Abd. S. 124—125.

Leute durchaus nicht bewältigen können. Hier müssen wir konsequent sein. Wenn ein Kind, obgleich der Lehrer ihm das ganze erforderliche Vorstellungsmaterial zurechtgelegt hat, dennoch das hierauf gebaute Urteil nicht auszusprechen vermag, so schliefst Höfler, »dafs es eben an — Urteilsfähigkeit fehle«[1]. Folglich müssen wir auch, wenn ein Mensch trotz aller Anstrengung und des besten Willens nicht im stande ist, eine lange Wörterreihe auswendig zu lernen, schliefsen, »dafs es eben an — Auswendiglernenfähigkeit fehle«. Und damit sind wir unzweifelhaft nicht fertig; eine ganze Reihe psychischer Kräfte wird sich nach und nach als notwendig erweisen. Es ist offenbar die alte Lehre von den Vermögen der Seele, die hier in modernisierter Gestalt ihren Spuk treibt; über diese Methode sollten wir aber doch am liebsten hinausgekommen sein. Glücklicherweise ist dieselbe denn auch ganz überflüssig.

Von Thätigkeit, Arbeit, kann nur da die Rede sein, wo Veränderungen vorgehen. Empfindungen, Vorstellungen und Gefühle sind eben aus diesem Grunde keine Arbeit zu nennen, da sie mehr oder weniger andauernde Zustände sind. Nur Veränderungen des Zustands können Arbeit sein, darum braucht aber nicht jede Veränderung des Bewufstseinszustandes eine psychische Arbeit zu sein. Dies ist z. B. nicht mit dem freien Vorstellungslaufe der Fall, den wir aus dem sogenannten »wachen Traume« kennen, wo die Gedanken nach Belieben kommen und gehen, wie auch aus dem scheinbar gesetzlosen Wechsel der Vorstellungen im wirklichen Traum. Es wird keinem Menschen beifallen, diese Erscheinungen zu psychischer Arbeit zu rechnen; im Gegenteil nennt man das wache Träumen im täglichen Leben »die Gedanken ruhen lassen«. Eine psychische Arbeit erhalten wir erst, wenn in den freien Vorstellungslauf Eingriffe geschehen, so dafs derselbe auf einen Zweck gelenkt wird, indem sich die Aufmerksamkeit auf bestimmte Vorstellungen richtet, die man festhält, während man andere beseitigt. Das Auswendiglernen, Phantasieren, das logische Denken u. dgl. werden mithin psychische Arbeit, weil zu allen diesen Thätigkeiten fortwährendes

---

[1] Cit. Ort. S. 96: Sep.-Abd. S. 53.

Eingreifen in den Vorstellungslauf und das Kontrollieren desselben erforderlich sind. Wodurch diese verschiedenen Thätigkeiten sich übrigens voneinander unterscheiden, brauchen wir hier nicht näher zu erörtern; dies läfst sich aus jedem Lehrbuche der von Höfler so tief verachteten »Associations-Psychologie« ersehen. Für uns ist es nur die Hauptsache, festzuhalten, dafs jede Veränderung des Zustandes eine psychische Arbeit ist, sobald sie auf einen bestimmten Zweck gerichtet wird, was ein Eingreifen in den freien Vorstellungslauf voraussetzt. Und dieses Eingreifen beruht auf, oder besteht in der Konzentration der Aufmerksamkeit auf bestimmte Zustände, die hierdurch auf Kosten andrer Zustände festgehalten werden. Die Aufmerksamkeit wird also, wenn man so will, die eigentliche »psychische Kraft«, welche die Arbeit verrichtet.

Hiermit soll natürlich durchaus nicht gesagt sein, dafs diese »psychische Kraft« von allen materiellen Verhältnissen unabhängig sei —, ja, es ist nicht einmal gegeben, dafs die Aufmerksamkeit überhaupt etwas Psychisches ist. Die Selbstbeobachtung zeigt uns nämlich niemals die Aufmerksamkeit selbst; wir beobachten nur deren Motive — gefühlsbetonte Vorstellungen — und deren Wirkung: dafs gewisse Bewufstseinszustände festgehalten, andre dagegen verdrängt werden. Das Wort »Aufmerksamkeit« bezeichnet also nur die Thatsache, dafs wir auf gegebenen Anlafs im stande sind, bestimmte psychische Zustände festzuhalten, für die wir zu irgend einem Zwecke Gebrauch haben. Die Thatsache selbst ist unbestreitbar und gehört zu unseren allgemeinsten psychologischen Erfahrungen; jedes Kind weifs ja, was das heifst, auf etwas aufmerksam sein. Wie die Aufmerksamkeit aber »wirkt«, was da geschieht, wenn wir aufmerksam sind, darüber sind die Psychologen sich bis jetzt nicht einig geworden. Dies zeigt an, dafs der Aufmerksamkeitsprozefs sich nicht unmittelbar beobachten läfst; wir sehen die Wirkungen, also es geschieht etwas, dies Etwas liegt aber offenbar aufserhalb unseres Bewufstseins. Die Möglichkeit läfst sich daher jedenfalls nicht ausschliefsen, dafs die Aufmerksamkeit ein physiologischer Prozefs wäre, der auf bestimmte Weise auf die psychischen Zustände influierte. Sollte

dies sich als richtig bestätigen — und a priori ist die Möglichkeit, wie gesagt, nicht abzuweisen — so müssen sowohl für die psychischen Thätigkeiten als für die psychischen Zustände mechanische Mafse zu finden sein, da beide diese Gruppen der Erscheinungen alsdann von Energieumsätzen im Gehirn abhängig werden. Hat Höfler dagegen recht darin, dafs psychische Kräfte von allen materiellen Verhältnissen unabhängig sein können, so werden sich für die von derartigen Kräften verrichteten Arbeiten keine mechanischen Äquivalente finden lassen. Hier liegt also eine Möglichkeit, dafs wir auf experimentellem Wege zur Entscheidung kommen können, welche dieser beiden Auffassungen die richtige ist.

Der Einflufs der Denkarbeit auf die Muskelarbeit. Wenn wir gleich anfangs eine der kompliziertesten psychischen Erscheinungen zur Untersuchung vornehmen, könnte es leicht scheinen, als widerstritte dies aller wissenschaftlichen Methode, die ein Fortschreiten vom Einfacheren zum mehr Zusammengesetzten als das Natürliche verlangt. Den hier betretenen Weg schlage ich jedoch aus guten Gründen ein. Wie wir später sehen werden, ist der Einflufs, den die psychischen Zustände — Empfindungen, Vorstellungen und gewisse Gefühle — auf die Muskelarbeit haben, ganz verschwindend klein. Hofft man deshalb darauf, ins klare darüber zu kommen, welche Bedeutung der Einwirkung der Bewufstseinserscheinungen auf die Muskelarbeit überhaupt beizulegen ist, so mufs man notwendigerweise mit der Untersuchung derjenigen Fälle anfangen, in welchen sich unzweifelhafte und entschiedene Resultate erreichen lassen. Es erweist sich nun, dafs dies von solchen komplizierten Erscheinungen wie dem Denken gilt, und können wir aus praktischen Gründen ohnehin nicht rationell verfahren, so machen wir den Anfang ebenso gut mit dieser als mit irgend einer anderen Erscheinung.

Wenn von Denkarbeit als Gegenstand experimenteller Untersuchung die Rede ist, wird man in seiner Wahl ziemlich beschränkt sein. Dies wird namentlich der Fall, wenn man die Resultate schwierigerer Arbeit mit denen weniger schwieriger Arbeit zu

vergleichen wünscht. Man wird dann fast ausschliefslich auf Rechenaufgaben hingewiesen sein, deren Schwierigkeit allerdings mit der Gröfse der Zahlen, mit denen man operiert, zunimmt. Der Mafsstab ist selbstverständlich für jedes einzelne Individuum verschieden, von der Übung des Betreffenden im Rechnen mit Zahlen abhängig; was der eine im Handumdrehen zu stande bringt, kann für den anderen eine ganz unlösliche Aufgabe sein, wenn er sie im Kopf rechnen soll. Weil der Anfangspunkt der Schwierigkeiten aber individuell verschieden ist, wird es darum doch nicht weniger sicher, dafs die Schwierigkeit mit der Gröfse der Zahlen wächst. Hierdurch wird es also möglich, sich eine Reihe von Arbeiten zu verschaffen, die an Schwierigkeit einigermafsen sanft zunehmen, und aufserdem kann man durch blofses Variieren der Zahlen eine fast unendliche Menge gleichartiger Arbeiten von derselben Schwierigkeit erzielen. Meines Wissens gibt es keine andre Art Denkarbeit, die sowohl so grofse Abwechselung als so feine Anmessung der Schwierigkeit gestattet; ich blieb deswegen ausschliefslich beim Kopfrechnen, das alle billigen Forderungen befriedigt.

Die Versuchsanordnung bei diesen Versuchen war ganz einfach. Die Aufgaben, die benutzt werden sollten, waren mit grofsen, deutlichen Zahlen auf Karton geschrieben; die Zahlen waren so untereinander angebracht, wie man sie gewöhnlich stellt, wenn man sich die Operation möglichst erleichtern will. Aus unten zu erörternden Gründen wurden fast alle Versuche paarweise angestellt, indem kurz aufeinander zwei gleichartige Aufgaben von möglichst gleicher Schwierigkeit, aber mit verschiedenen Kombinationen der Zahlen, gegeben wurden, so dafs die letztere durch das eben vorhergehende Ausrechnen der ersteren keine Erleichterung fand. Neben dem Ergographen war vor der V-P ein kleines Stativ angebracht, auf welchem der Experimentator geschwind das Papier mit der Aufgabe anbringen konnte. Der Verlauf der Versuche war nun folgender. Wenn die V-P sich klar zur Arbeit gemeldet hatte, wurde der Kymograph in Gang gesetzt, worauf die V-P zu arbeiten begann. Sobald eine passende Anzahl, 15—20, Partialarbeiten ausgeführt waren, brachte

der Experimentator den Karton mit der Aufgabe im Stative an, und die V-P machte sich sogleich an die Lösung der Aufgabe. Dieser Moment wurde vom Experimentator mittels des hierzu eingerichteten Signalapparats (siehe I. Teil, S. 31) auf der Walze des Kymographen markiert. War die Aufgabe gelöst, so gab die V-P dies durch ein Nun! an, und der Experimentator machte wieder ein Zeichen; zugleich wurde die benutzte Aufgabe entfernt. Die V-P setzte mittlerweile die Arbeit am Ergographen fort, ohne sich stören zu lassen. Nachdem wieder eine Anzahl von etwa 15 Partialarbeiten ausgeführt war, wurde die zweite Aufgabe derselben Art wie die erste im Stativ angebracht, und mit dieser verfuhr man ganz wie mit der ersten. Nach ihrer Lösung wurde der Versuch durch 15—20 Partialarbeiten abgeschlossen. Wo nichts andres angegeben ist, war der Takt in allen Fällen 40 pr. Min. — Wir betrachten nun die Ergebnisse der solchergestalt angestellten Versuche.

Löst man eine Aufgabe im Kopfrechnen, während man zugleich auf den Ergographen wirkt, so zeigt es sich sofort, dafs diese beiden Arbeiten, die geistige und die körperliche, nicht voneinander unabhängig sind; sie influieren gegenseitig aufeinander. Auffallend ist der Einflufs der geistigen Arbeit auf die körperliche; die Gröfse der Partialarbeiten nimmt ab, man kann keine maximalen Muskelkontraktionen mehr ausführen. Dies geht aus Pl. XXI—XXIII deutlich hervor. Alle hier wiedergegebenen Ergogramme zeigen mehr oder weniger entschiedene Abweichungen vom normalen Verlauf, und diese Abweichungen sind einer gleichzeitig ausgeführten Denkarbeit zu verdanken. Die beiden Pfeile, die in allen erwähnten Ergogrammen am Anfang und am Ende einer Senkung stehen, markieren die Momente des Anfangs und des Abschlusses eines Rechenexempels. Die Verminderung der Partialarbeiten dauert also genau so lange an wie die Denkarbeit; die beiden Erscheinungen sind in jeder Beziehung gleichzeitig, und es kann daher keinen Zweifel erleiden, dafs die Denkarbeit auf irgend eine Weise die Verminderung der Arbeit verursacht. Dies ist indes nur die eine Seite der Sache. Die körperliche Arbeit influiert ebenfalls auf die Denkarbeit; dies

läſst sich natürlich aber nicht veranschaulichen, sondern nur durch Selbstbeobachtung konstatieren. Glücklicherweise läſst sich zugleich aber doch ein entscheidender Beweis für die Richtigkeit der Selbstbeobachtung führen. Der Einfluſs der Muskelarbeit auf die Denkarbeit erweist sich nämlich als wesentlich darin bestehend, daſs es schwierig wird, die Resultate der einzelnen Rechenoperationen im Gedächtnisse zu behalten. Nehmen wir ein bestimmtes Beispiel. Hat man auf einem Stücke Papier vier dreistellige Zahlen untereinander stehen, so wird jeder, der nur einigermaſsen im Rechnen geübt ist, im stande sein, in wenigen Sekunden diese vier Zahlen zu addieren und das erschienene Resultat zu nennen. Dies ist aber so gut wie unmöglich, wenn man zugleich mit dem Ergographen arbeitet. Natürlich läſst es sich thun, die herausgekommenen Zahlen zu behalten, dann wird die Gröſse der Partialarbeiten aber noch viel kleiner. Arbeitet man dagegen so stark, wie die Rechenoperationen es nur gestatten, so zeigt es sich sogleich, daſs man die Summe der ersten Zahlenreihe vergessen hat, wenn man die Summe der zweiten bekommt. Eine Addition kann zwar völlig gelingen, indem man alle einzelnen Zahlen zusammenlegt, das Resultat als Totalität läſst sich jedoch nicht angeben. Die Folge hiervon ist, wie leicht zu ersehen, daſs eine gröſsere Multiplikation gar nicht vollführt werden kann. Handelt es sich z. B. darum, eine dreistellige Zahl mit einer zweistelligen zu multiplizieren, so kann man verfahren, wie man will; während man eine Multiplikation ausführt, vergiſst man das Resultat der vorhergehenden, so daſs man die herausgekommenen Gröſsen nicht addieren kann. In Wirklichkeit gelingt es also gar nicht, die Multiplikation auszuführen; man löst sie in eine Reihe einzelner Multiplikationen auf, und weiter kommt man nicht.

Für die Richtigkeit dieser auf Selbstbeobachtung gestützten Darstellung haben wir nun einen guten Beweis an der Thatsache, daſs es unter gewöhnlichen Verhältnissen keiner meiner Versuchspersonen gelang, das Resultat der ausgerechneten Exempel richtig anzugeben. Dr. B., unbedingt derjenige, der das beste Zahlengedächtnis hatte, und der deshalb am schnellsten

und sichersten rechnete, gab mitunter das gefundene Resultat an, das aber nicht ein einziges Mal richtig war. Die anderen Versuchspersonen stellten nie einen Versuch in dieser Richtung an, da sie ein deutliches Gefühl von dessen Hoffnungslosigkeit hatten. Infolge dieser eigentümlichen Verhältnisse bestand die Denkarbeit bei fast allen, jetzt näher zu besprechenden Versuchen ausschliefslich in der Ausführung solcher Rechenoperationen, die nicht erforderten, dafs die bereits gewonnenen Resultate im Gedächtnisse blieben. Da man sie nicht zu behalten vermochte, hatte man guten Grund, nicht weiter damit zu rechnen. Diese praktische Konsequenz hat indes bei weitem nicht so grofses Interesse wie das in theoretischer Beziehung wichtige Resultat, dafs die Muskelarbeit auf die Denkarbeit influiert und namentlich das Erinnern erschwert. Bei der Lösung einer Aufgabe im Kopfrechnen werden die eigentlichen Rechenoperationen nur in geringem Grade von gleichzeitiger Muskelarbeit beeinflufst werden, während das Behalten der Resultate des Rechnens jedenfalls äufserst schwierig wird.

Die angeführte Thatsache öffnet, wie leicht zu sehen, die Möglichkeit, eine Art Mafs für wenigstens zwei verschiedene Gattungen psychischer Arbeit zu finden, nämlich für die eigentlichen Rechenoperationen und für die Gedächtnisarbeit. Man braucht nur die beiden folgenden Versuche anzustellen. Einmal führt man ein Rechenexempel auf die oben beschriebene Weise aus, so dafs man die Operationen unternimmt, ohne einen Versuch zu machen, die partiellen Resultate im Gedächtnisse zu behalten. Ein andermal rechnet man ein Exempel derselben Art und Schwierigkeit, und zwar so, dafs man zugleich das richtige Resultat anzugeben vermag. Dies wird der obigen Darstellung zufolge nur dadurch möglich, dafs die gleichzeitige Muskelarbeit sehr beträchtlich vermindert wird. Die Verminderung der Arbeit, die man auf diese Weise in den beiden Fällen findet, ist dann offenbar der Ausdruck für die relative Schwierigkeit der beiden psychischen Arbeiten. Später werden wir auf Versuche dieser Art näher eingehen, hier wollen wir den Gedanken nicht weiter verfolgen. Wenn ich gleich anfangs auf die Schwierigkeit auf-

merksam machte, welche das Erinnern der Resultate des Rechnens darbietet, so geschah dies nur, um genau angeben zu können, in welchem Umfange die gestellten Rechenaufgaben gelöst — oder vielmehr: nicht gelöst wurden. Denn wegen der grofsen Schwierigkeiten, die Resultate zu behalten, verlangte ich dies nicht. Wie schon gesagt, wurde nur verlangt, dafs die Rechenoperationen genau und sicher ausgeführt würden, und zwar in so grofsem Umfang, wie es möglich war, wenn die partiellen Resultate des Rechnens ebenso schnell, wie sie gefunden waren, wieder vergessen wurden.

Nachdem wir nun die Beschaffenheit der verrichteten psychischen Arbeit erörtert haben, betrachten wir die einzelnen Versuche und die Resultate, die sich hieraus ableiten lassen. Dafs die psychische Arbeit in allen Fällen eine Verminderung der gleichzeitigen körperlichen herbeiführt, ist durchaus unzweifelhaft. Dies genügt aber nicht; um die Verminderung der Arbeit als Mafs für die psychische Arbeit gebrauchen zu können, mufs zwischen den beiden Thätigkeiten ein gesetzmäfsiges Verhältnis bestehen. Vor allen Dingen müssen wir daher in Erfahrung bringen, wie die einer bestimmten psychischen Arbeit entsprechende Verminderung der Arbeit mit der Ermüdung der Muskeln variiert. Ist hier kein bestimmtes Gesetz zu finden, so wird die Verminderung der Arbeit offenbar auch nicht zum Mafs der psychischen Thätigkeit brauchbar, weil wir dann verschiedene Werte für eine und dieselbe, aber in verschiedenen Stadien der Ermüdung verrichtete psychische Arbeit finden würden. Zu diesem Zwecke, um die Abhängigkeit der Verminderung der Arbeit von der Ermüdung zu bestimmen, wurde die oben beschriebene Ordnung der Versuche mit zwei gleichartigen Rechenaufgaben im Laufe jedes Ergogramms durchgeführt. Sehen wir nun erst, welche Resultate sich hieraus ableiten lassen.

Wollen wir uns nicht darauf beschränken, nur eine Verminderung der Arbeit zu konstatieren, sondern verlangen wir zugleich ein Mafs für deren Gröfse, so müssen wir notwendigerweise bestimmen, wie das Ergogramm ausgesehen haben würde, hätte nicht zu gleicher Zeit eine psychische Thätigkeit stattgefunden. Wegen

der vielen kleinen Unregelmäfsigkeiten der Ergogramme ist es nicht ganz ratsam, einfach die Endpunkte der Ordinaten miteinander zu verbinden. Denn da die beiden Ordinaten unmittelbar vor und nach der Ausführung der psychischen Arbeit zweifelsohne mit zufälligen Fehlern behaftet sind, wird eine die Endpunkte dieser beiden Ordinaten verbindende Linie ganz gewifs nicht dem wahrscheinlichen Verlaufe des Ergogramms zwischen den beiden Punkten entsprechen. Um von dem wahrscheinlichen Verlauf der Kurve ein möglichst genaues Bild zu erhalten, bediente ich mich der früher beschriebenen Eliminationsmethode (vgl. S. 157). Die drei Strecken des Ergogramms, welche vor, zwischen und hinter den ausgeführten psychischen Arbeiten liegen, wurden jede für sich in Gruppen von 5—7 Partialarbeiten eingeteilt. Für jede Gruppe nahm ich das Mittel der Gröfse der Partialarbeiten und dieses Mittel setzte ich als Ordinate mitten in der Gruppe ab. In den auf diese Weise bestimmten Ordinaten sind die zufälligen Variationen gewifs nach Möglichkeit eliminiert, und durch die Endpunkte dieser Ordinaten wird eine kontinuierte Kurve gelegt. Diese zeigt also den Verlauf, den das Ergogramm wahrscheinlich gehabt haben würde, wäre keine psychische Arbeit verrichtet[1]. In alle Ergogramme der Plane XXI—XXIV sind diese wahrscheinlichen Kurven eingetragen; bei den Details ihrer Bestimmung werde ich nicht verweilen.

Haben wir auf diese Weise den wahrscheinlichen Verlauf der Ergogramme gefunden, so ist es eine leichte Sache, die Verminderung der Arbeit während der psychischen Thätigkeit zu bestimmen. Die wirklich verrichtete Arbeit, A_v, erhält man nämlich durch einfache Summation der Höhen der Partialarbeiten. Die wahrscheinliche Arbeit, A_s, findet man, indem man die Gröfsen der Ordinaten der wahrscheinlichen Kurve mifst und zusammenlegt, oder leichter, indem man das Areal der Figur berechnet, die von der ersten und der letzten Ordinate zwischen den beiden Pfeilen begrenzt

[1] Ein naheliegender Einwurf, der sich gegen diese Bestimmung des wahrscheinlichen Verlaufs erheben läfst, wird unten besprochen werden.

wird. Da die wahrscheinliche Kurve kürzere Strecken hindurch als eine Gerade betrachtet werden kann, wird das von zwei Ordinaten begrenzte Areal ein Paralleltrapez, dessen Gröfse sich aus der Höhe der begrenzenden Ordinaten und der gesamten Anzahl der zwischen den beiden Grenzen gelegenen Ordinaten berechnen läfst. Auf diese Weise bestimmte ich alle im Folgenden angegebenen Werte von A_s. Es ist nun also die Aufgabe, ein gesetzmäfsiges Verhältnis zwischen A_s und A_r zu finden; zu diesem Zwecke gehen wir die Ergogramme einzeln durch.

Pl. XXI, A. d. 15/2. A. L. Addition von vier dreistelligen Zahlen.

Dieser Versuch ist der erste dieser Art, den ich ausführte. Er ist zunächst als völlig mifslungen zu betrachten und forderte eigentlich nicht zu weiteren Bemühungen in dieser Richtung auf. Es läfst sich nämlich denken, dafs zwei Gröfsen als Mafs für die psychische Arbeit anwendbar wären: entweder die absolute Verminderung der Arbeit, $A_s - A_r$, oder auch die relative Verminderung der Arbeit, $(A_s - A_r)/A_s$. Wir müssen deshalb erst sehen, wie es sich mit diesen Gröfsen verhält.

	A_s	A_r	$A_s - A_r$	$(A_s - A_r)/A_s$
Arbeit I	48,0	42,7	5,3	0,11
» II	31,2	23,5	7,7	0,25

Hieraus geht hervor, dafs weder die Differenz noch das Verhältnis zwischen den beiden Arbeiten eine konstante Gröfse ist. Das gesetzmäfsige Verhältnis, das zweifelsohne zwischen der psychischen Arbeit und der Verminderung der körperlichen Arbeit stattfinden mufs, ist also nicht so leicht zu gewahren. Aus diesem Grunde wurden die hierauf bezüglichen Versuche vorläufig eingestellt und erst wieder aufgenommen, als ein grofser Teil der früher besprochenen ergographischen Versuche vollführt war. Diese Ordnung erwies sich als ganz praktisch, denn als die Versuche wieder aufgenommen wurden, trat die gesuchte Gesetzmäfsigkeit sogleich hervor. Dafs ich bei diesem ersten, mifslungenen Versuche verweile, geschieht eigentlich nur, um hieraus die Lehre zu ziehen, dafs man auch auf

diesem Gebiete zu falschen Resultaten kommen wird, wenn man die Sache verkehrt anfaſst. Und ganz besonders gilt hier wie bei den meisten anderen experimentell-psychologischen Untersuchungen: sind die Versuchspersonen in der speziellen Art der Arbeit nicht gut eingeübt, so ist kein brauchbares Versuchsmaterial zu erhalten. Der hier besprochene Versuch miſslang gerade, weil die betreffende V-P in der Arbeit mit dem Ergographen keine hinlängliche Übung besaſs; sie ermüdete zu schnell. Dies ist direkt aus dem Verlaufe des Ergogramms zu ersehen. Während der psychischen Arbeit ruhen die Muskeln ein wenig, da sie keine maximale Arbeit verrichten. Die Folge hiervon wird die, daſs die Ermüdung der Muskeln nach Ausführung der psychischen Arbeit nicht so groſs ist, wie sie geworden wäre, wenn keine psychische Arbeit stattgefunden hätte. Nach Abschluſs der letzteren werden die Partialarbeiten also verhältnismäſsig groſs, diese Wirkung wird sich aber beim ungeübten Muskel sogleich wieder verlieren, so daſs das Ergogramm darauf jäh herabsinkt. Wie man sieht, ist eben dies mit dem Ergogramm Pl. XXI, A der Fall, während es in allen folgenden, auf späteren Übungsstufen ausgeführten Ergogrammen fast gar nicht vorkommt. Hier sind die Partialarbeiten nach den Senkungen natürlich auch relativ groſs, diese Höhe erhält sich aber, es tritt kein jäher Sturz ein, weil die Muskeln nicht so geschwind ermüden. In diesem Falle tritt nun auch die Gesetzmäſsigkeit hervor, die wir beim ersten Experimente vergeblich suchten.

Pl. XXI, B. d. $^{26}/_{2}$. A. L. Addition von vier dreistelligen Zahlen.

	A_s	A_v	$A_s - A_v$	$(A_s - A_v)/A_s$
Arbeit I	53,9	42,2	11,7	0,22
» II	34,5	27,5	7,0	0,20

Während die absolute Verminderung der Arbeit bei den beiden Arbeiten einen sehr bedeutenden Unterschied aufzeigt, ist die relative Verminderung $(A_s - A_v) / A_s$ dagegen konstant. Es erweist sich nun, daſs dieses Verhältnis gemeingültig ist, und es tritt um so deutlicher und unzweifelhafter hervor, je gröſser die psychische Arbeit wird.

Pl. XXI, C. d. ³/₃. A. L. Addition von sechs fünfstelligen Zahlen.

Selbst wenn man nicht darauf ausgeht, das Resultat der Berechnung im Gedächtnisse zu behalten, wird die Addition von sechs fünfstelligen Zahlen nicht nur längere Zeit erfordern als die Addition von vier dreistelligen, sondern sie wird auch eine schwierigere Arbeit sein, da man mit gröſseren Zahlen operieren muſs. Daſs 8 + 5 gleich 13 ist, weiſs jedermann; wer aber nicht alle Tage groſse Zahlenreihen summiert, muſs doch ein wenig nachdenken, um zu wissen, daſs 28 + 5 = 33. Die Schwierigkeit wächst also, wenngleich in sehr geringem Grade, je höher man in der Reihe der Zahlen gelangt, was natürlich darin liegt, daſs die Associationen nicht so geläufig gehen, weil sie weniger häufig vorkommen. Die gröſsere Schwierigkeit dieses Rechenexempels im Vergleich mit dem vorhergehenden kommt nun auch in den Zahlen zum Vorschein.

	A_s	A_r	$A_s - A_r$	$(A_s - A_r) / A_s$
Arbeit I	82.5	55.1	27.4	0.33
» II	47,3	29,4	17,9	0,38

Hier ist, wie man sieht, ein so groſser Unterschied zwischen den Werten der absoluten Arbeitsverminderung, daſs nicht davon die Rede sein kann, diese Gröſse als konstant zu betrachten. Dagegen weichen die Gröſsen der relativen Arbeitsverminderung in den beiden Fällen nur sehr wenig voneinander ab, und diese Zahlen sind ein wenig gröſser als die entsprechenden des vorigen Versuches. Dies stimmt völlig mit dem überein, was von der Gröſse der verrichteten psychischen Arbeiten nachgewiesen wurde. Je gröſser dieselbe ist, um so kleiner muſs A_r werden, und mithin nimmt $(A_s - A_r) / A_s$ zu. Der gröſsten psychischen Arbeit entspricht folglich der gröſste Wert von $(A_s - A_r) / A_s$, und es zeigte sich, daſs gerade dies der Fall war. Noch deutlicher tritt dies hervor, wenn wir eine schwierigere Rechenaufgabe, z. B. eine gröſsere Multiplikation nehmen, was aus folgendem Versuche hervorgeht.

Pl. XXII, A. d. ⁵/₃. A. L. Arbeit I: 657 × 34. Arbeit II: 392 × 43.

Schon der bloſse Anblick der Ergogramme zeigt

hier, dafs die psychischen Arbeiten nicht nur ziemlich lange Zeit erforderten, sondern auch, dafs sie mit bedeutender Schwierigkeit verbunden waren; die verrichtete Muskelarbeit ist sehr klein. Infolge dessen wird die Art und Weise, wie wir den wahrscheinlichen Verlauf des Ergogramms bestimmen, höchst unzuverlässig. Denn wenn die Muskeln während längerer Zeit nur so geringe Arbeit verrichten, wie das Ergogramm hier anzeigt, so nimmt die Ermüdung nicht besonders zu. Deshalb werden die Partialarbeiten nach der psychischen Arbeit viel gröfser, als sie zu diesem Zeitpunkte gewesen wären, wenn keine psychische Arbeit stattgefunden hätte. Die eingezeichnete wahrscheinliche Kurve ist deshalb aufser allem Zweifel unrichtig, sie liegt nicht so wenig höher, als sie eigentlich sollte. Die hieraus berechnete wahrscheinliche Arbeit A_s wird also zu grofs, und mithin wird auch $(A_s - A_r)/A_s$ zu grofs. Es ist in dieser Beziehung ohne Bedeutung, in welchem Stadium der Muskelermüdung wir die psychische Arbeit ausführen; die Partialarbeiten müssen nach dem Rechenexempel jedenfalls gröfser werden, als sie eigentlich sein sollten. Bei beiden ausgeführten Rechenaufgaben wird die eingezeichnete wahrscheinliche Kurve daher um gar nicht so wenig zu hoch liegen. Ob nun der Fehler, den wir somit bei der Berechnung von $(A_s - A_r)/A_s$ begehen, für Arbeit I und II gleich grofs wird, das wissen wir nicht, grofs kann der Unterschied aber gewifs nicht werden, da der Wert von $(A_s - A_r)/A_s$ doch annähernd konstant wird. Das Wesentlichste ist also, dafs diese Gröfse nach der Weise, wie sie berechnet wird, thatsächlich ein wenig zu grofs werden mufs, wenn die psychische Arbeit eine so bedeutende Arbeitsverminderung bewirkt, wie es hier der Fall ist.

	A_s	A_r	$A_s - A_r$	$(A_s - A_r)/A_s$
Arbeit I	159,6	72,6	87,0	0,54
» II	105,3	40,0	65,3	0,62

Um nun sicher sein zu können, dafs die gefundene Gesetzmäfsigkeit hier nicht rein individuell ist, untersuchen wir einige von einer anderen V-P ausgeführte Ergogramme, indem wir zugleich psychische Arbeiten von wesentlich verschiedener Schwierigkeit wählen.

Pl. XXI, D. d. 3/3. Dr. B. Summation von sechs fünfstelligen Zahlen.

	A_s	A_v	$A_s - A_v$	$(A_s - A_v)/A_s$
Arbeit I	61,2	51,0	10,2	0,17
» II	45,9	35,3	10,6	0,23

Dieses Experiment ist lehrreich, weil es zeigt, wie die zufälligen Fehler so grofs werden können, dafs $A_s - A_v$ nahe daran ist, eine konstante Gröfse zu werden, wodurch $(A_s - A_v)/A_s$ für die beiden gleichartigen psychischen Arbeiten selbstverständlich verschiedenen Wert erhalten mufs. Die Ursache dieser zufälligen Fehler wird gleich im Folgenden erörtert werden. Hier führe ich nur noch einen Versuch mit derselben V-P an, aus welchem deutlich hervorgeht, dafs es wirklich nur auf einem Zufall beruht, wenn die absolute Arbeitsverminderung sich im vorigen Versuche konstant zeigte.

Pl. XXII, B. d. 5/3. Dr. B. Arbeit I: 657×34. Arbeit II: 392×43.

	A_s	A_v	$A_s - A_v$	$(A_s - A_v)/A_s$
Arbeit I	156,8	96,7	60,1	0,38
» II	88,2	47,3	40,9	0,46

Hier ist, wie man sieht, der Unterschied zwischen den beiden Werten von $A_s - A_v$ ein so bedeutender, dafs sich nicht wohl denken läfst, er sollte auf einem Zufall beruhen, dagegen kommen die beiden Werte für die relative Arbeitsverminderung sich sehr nahe. Gleichgrofs sind sie allerdings nicht, und geht man alle im Vorhergehenden angeführten Ausmessungen durch, so wird man fast überall finden, dafs die Arbeit II mit dem gröfsten Werte auftritt. Wenn wir aber später zur Untersuchung der Fehlerquellen bei diesen Experimenten gelangen, wird es sich erweisen, wie dieselben gerade bewirken müssen, dafs die letzte psychische Arbeit etwas gröfser wird als die erste. Ebenfalls werden wir sehen, dafs man durch eine ein wenig veränderte Arbeitsweise diesen Fehler fast gänzlich zu eliminieren vermag. Es wird deshalb berechtigt, die Abweichung der zusammengehörenden Werte $(A_s - A_v)/A_s$ voneinander als einen durch die Versuchsanordnung eingebrachten Fehler zu betrachten, und wir können

daher als Resultate dieser Versuche folgendes feststellen:

Wenn eine psychische Arbeit, wie Kopfrechnen, gleichzeitig mit einer körperlichen, maximale Muskelanspannung erfordernden Arbeit ausgeführt wird, so wird die psychische Arbeit eine Verminderung der gleichzeitigen körperlichen zur Folge haben, und die Verminderung wird um so gröfser, je schwieriger die psychische Arbeit ist. Das Verhältnis zwischen dem absoluten Werte der Arbeitsverminderung und der Gröfse der körperlichen Arbeit, die ausgeführt worden wäre, wenn keine psychische Arbeit stattgefunden hätte, erweist sich als eine von der Muskelermüdung unabhängige, konstante Gröfse, so dafs dieses Verhältnis, die relative Arbeitsverminderung, sich also als Mafs für die Gröfse der psychischen Arbeit gebrauchen läfst.

Der Bequemlichkeit halber bezeichnen wir im Folgenden die relative Arbeitsverminderung $(A_s - A_v)/A_s$ durch M. Vergleichen wir, in den oben besprochenen Versuchen, die für die beiden Versuchspersonen gefundenen Werte von M miteinander, so stellt es sich dar, dafs gleichartige Aufgaben keineswegs für beide Versuchspersonen denselben Wert von M ergaben. Dr. B., der unbedingt am schnellsten und sichersten rechnete, und dem eine gegebene Aufgabe daher thatsächlich verhältnismäfsig geringere Schwierigkeit bereitete, erhält denn auch fortwährend geringere Werte von M. Diese Gröfse, M, läfst sich also nicht nur als Mafs für die relative Schwierigkeit verschiedener psychischer Arbeit für dieselbe V-P gebrauchen, sondern kann ebenfalls auch dazu dienen, verschiedene Versuchspersonen mit Bezug auf die ihnen durch dieselbe Arbeit bereitete Schwierigkeit miteinander zu vergleichen. Dies fällt besonders auf, wenn wir eine V-P nehmen, deren Ergogramme von den bisher untersuchten bedeutend abweichen. Dies gilt z. B. von Fnn, der d. $^{20}/_{2}$ einen ziemlich heftigen Anfall der Influenza erlitt, welcher eine ganz erstaunliche Abnahme der Muskelarbeit bewirkte. Sowohl die

Höhe als die Länge der Ergogramme nahm stark ab, und es verlief fast ein Monat, bis es ihm wieder gelang, Ergogramme von derselben Gröfse wie vor der Krankheit zu leisten. Er eignete sich deshalb auch nicht zum Objekt weitläufigerer Versuche, die wenigen an ihm angestellten sind in diesem Zusammenhang aber sehr illustrierend. Ich gebe einen derselben wieder.

Pl. XXV, A. d. 3/4. Fnn. Summation von sechs fünfstelligen Zahlen.

Die V-P rechnete ziemlich leicht und sicher, das Ausrechnen nahm aber so viel Zeit in Anspruch, dafs nur ein Versuch angestellt werden konnte. Das Eigentümliche des Ergogramms ist die geringe Höhe der Partialarbeiten, die bei einem Vergleich mit den Ergogrammen in den Pl. XXI—XXIV auffällt. Dennoch erhalten wir einen ganz passenden Wert der Arbeitsverminderung:

$$A_s = 75{,}2 \quad A_r = 43{,}9 \quad A_s - A_r = 31{,}3 \quad M = 0{,}42.$$

Für ganz dieselbe Arbeit fanden wir oben mit Bezug auf A. L. (Pl. XXI, C) $M = 0{,}33$ und $0{,}38$, so dafs Fnn's Geschicklichkeit im Rechnen demnach ein wenig geringer sein sollte, was sie gewifs auch ist. Zu dem oben angegebenen Satze können wir jetzt daher folgendes hinzusetzen:

Die relative Arbeitsverminderung, die eine gegebene Aufgabe bewirkt, ist individuell verschieden, von der Schwierigkeit abhängig, welche die bestimmte psychische Arbeit jedem einzelnen Individuum darbietet. Hieraus folgt, dafs die relative Arbeitsverminderung auch dazu dienen kann, verschiedene Individuen hinsichtlich ihrer Fähigkeit, eine vorgelegte psychische Arbeit zu lösen, miteinander zu vergleichen.

Streng genommen, haben wir so viel indes noch nicht bewiesen. Freilich fanden wir, dafs M unter verschiedenen Umständen sehr verschiedene Werte erhält, ob dies aber von der psychischen Arbeit, von den geistigen Thätigkeiten oder möglicherweise nur von den verschiedenen Vorstellungen, mit welchen operiert wird, herrührt, kam noch nicht zur Entscheidung. Es

wäre ja sehr wohl denkbar, dafs eben die psychischen Thätigkeiten, die logischen und die associativen Prozesse, von allen materiellen Erscheinungen unabhängig wären, mithin keinen Einflufs auf die Muskelarbeit hätten; die wahrgenommene Arbeitsverminderung müfste dann von den im Bewufstsein auftretenden Vorstellungen herrühren, die ohne Zweifel von Energieumsätzen im Gehirn abhängig sind. Welche dieser Auffassungen die rechte ist, mufs offenbar durch einen vergleichenden Versuch zu entscheiden sein. Wir brauchen nur eine Reihe von Vorstellungen in unserem Bewufstsein entstehen zu lassen, in einem Falle als Resultat einer sinnlichen Wahrnehmung, in einem anderen Falle als Resultat einer logischen Operation. Erhalten wir in beiden Fällen dieselbe relative Arbeitsverminderung, so ist hiermit gegeben, dafs die psychische Thätigkeit gar keinen Einflufs hat; es müssen dann die Vorstellungen sein, die an und für sich die Arbeitsverminderung bewirken. Wie ein solches Experiment ausgeführt werden kann, läfst sich leicht durch ein Beispiel zeigen. Nehmen wir an, dafs wir eine Addition der vier Zahlen 385, 672, 913, 485 ausführen, und dafs diese auf gewöhnliche Weise untereinander aufgeschrieben sind. Während des Rechnens entstehen nun successiv folgende Vorstellungen: 5 + 2 macht 7, + 3 macht 10, + 5 macht 15, und indem nun der Zehner zur nächsten Reihe gefügt wird: 1 + 8 macht 9, + 7 macht 16 u. s. w. Schreiben wir nun alle diese successiven Zahlen auf ein Stück Papier, so leuchtet es ein, dafs man ganz dieselben Vorstellungen beim Durchlesen dieser Zahlen wie bei der Ausführung der Berechnung erhalten wird. In beiden Fällen ist der Vorstellungslauf derselbe, in einem Falle sind die Vorstellungen nur durch Anschauung gegeben, im anderen entstehen sie durch logisch-associative Thätigkeit. Die Frage ist also nur, ob wir denselben Wert von *M* erhalten, gleichviel ob die Vorstellungen auf die eine oder die andere Weise kommen. Die Antwort hierauf erhalten wir, wenn wir das Ergogramm Pl. XXI, B, welches uns das Resultat der Addition der vier dreistelligen Zahlen zeigt, vergleichen mit:

Pl. XXIII, A. 10/10. A.L. Durchlesen einer Zahlenreihe.

Die bei diesem Experimente durchgelesene Zahlenreihe war eben diejenige, welche auf oben beschriebene Weise durch Addition der vier Zahlen herauskommt. Damit der Experimentator kontrollieren konnte, dafs die Zahlenreihe wirklich klar aufgefafst sei, wurde die ganze Reihe halblaut hergesagt. Das Hersagen fand während des Zeitraums statt, der zwischen den beiden Pfeilen im Ergogramm liegt. Man sieht hieraus, dafs das Hersagen keinen nachweisbaren Einflufs auf die Muskelarbeit hatte, wogegen die Addition der Zahlen eine sehr mefsbare Arbeitsverminderung bewirkte. Dieser Versuch wurde auf mancherlei Weise variiert, hatte aber immer dasselbe Resultat. Nicht-gefühlsbetonte Empfindungen jeder beliebigen Art und Dauer bewirken also nie eine mefsbare Arbeitsverminderung. Es gibt namentlich einen Versuch, der sich sehr leicht anstellen läfst, und der deutlich zeigt, dafs die Lenkung der Aufmerksamkeit auf sinnliche Empfindungen nicht auf die Muskelarbeit influiert. Wenn man mit dem Ergographen arbeitet, wird man gewöhnlich die Aufmerksamkeit ausschliefslich auf die Muskelarbeit konzentriert halten, so dafs man sich kaum bewufst ist, die die einzelnen Züge auslösenden Taktschläge des Metronoms zu hören. Dennoch hört man dieselben, denn kommt man einen Augenblick aus dem Takt, so hält man unwillkürlich ein, um wieder in Takt zu kommen. Arbeitet man nun in regelmäfsigem Takte, mit voller Aufmerksamkeit auf die Muskelbewegungen, so kann man plötzlich die Aufmerksamkeit willkürlich auf die Taktschläge richten und diesen horchen — was jedoch keine nachweisbare Verminderung im Ergogramme herbeiführt. Die Kurve Pl. XXIII, A ist daher völlig typisch, und wir können also folgendes Resultat feststellen:

Unbetonte Empfindungen und Vorstellungen haben keinen mefsbaren Einflufs auf die gleichzeitige körperliche Arbeit. Es sind nur die psychischen Thätigkeiten, die eine Arbeitsverminderung bewirken, und die Gröfse der letzteren ist unabhängig von den Vorstellungen, mit welchen man operiert.

Man bekommt also wohl schwerlich Gebrauch für die

von Höfler angedeuteten psychischen Kräfte, die mit materiellen Erscheinungen in keiner Verbindung stehen sollten. Die Arbeitsverminderung rührt, wie wir sahen, gerade von den psychischen Thätigkeiten her, folglich müssen diese auch auf irgend eine Weise mit den körperlichen Prozessen in Verbindung stehen und auf dieselben influieren. Liegt nun übrigens etwas Berechtigtes in der oben dargestellten Auffassung, dafs alle psychische Thätigkeit nur in verschiedenen Äufserungsformen der Aufmerksamkeit besteht, so ist es also eigentlich die Stärke der letzteren, die durch die relative Arbeitsverminderung gemessen wird. Eine ganz interessante Konsequenz läfst sich hieraus ziehen. Eine psychische Arbeit, z. B. die Lösung einer Rechenaufgabe, kann von dem hierin Geübten auf höchst verschiedene Weise ausgeführt werden. Man kann langsam und gründlich, mit voller Aufmerksamkeit rechnen, so dafs man der Richtigkeit des Fazits ganz sicher ist; man kann aber auch schnell und oberflächlich rechnen, indem man die Zahlen schnell überblickt; das Fazit kann auch in diesem Falle richtig werden, nur fühlt man sich dessen nicht ganz sicher. Zwischen diesen beiden Äufserlichkeiten liegen natürlich viele Zwischenstufen, mit gröfserer oder geringerer Gründlichkeit des Ausrechnens und den daraus folgenden Graden der Sicherheit, was die Richtigkeit des Fazits betrifft. Alle diese vielen Stadien sollten sich also — der dargestellten Auffassung zufolge — eigentlich nur durch die stärkere oder schwächere Konzentration der Aufmerksamkeit unterscheiden, und für diese sollten wir nun an M, der relativen Verminderung der gleichzeitigen körperlichen Arbeit, ein Mafs besitzen. Es wird gewifs von Interesse sein, diese Konsequenz einer experimentellen Prüfung zu unterwerfen.

Bekanntlich ist es nicht leicht — oder vielmehr, es ist ganz unmöglich, — eine Arbeit mit einem willkürlich festgestellten Grade der Aufmerksamkeit auszuführen. Man kann die Aufmerksamkeit völlig auf eine Arbeit konzentriert halten, oder man kann diese mit einem Minimum der Aufmerksamkeit verrichten, zwischen diesen beiden Grenzen einen bestimmten Grad der Aufmerksamkeit mit Sicherheit festzustellen, ist aber nicht möglich. Bei einem Experimente der erwähnten Art

wird man deshalb ganz natürlich darauf angewiesen sein, die beiden Grenzfälle, das Maximum und das Minimum der Aufmerksamkeit, und darauf irgend ein Zwischenstadium zu prüfen, von dem man indes durchaus nicht mit Sicherheit wissen kann, ob es in den beiden Versuchen das gleiche wird. Besteht die psychische Arbeit in der Lösung einer Aufgabe im Kopfrechnen, so sichert man sich das Maximum der Aufmerksamkeit am besten, wenn man verlangt, dafs das Fazit der Aufgabe behalten und richtig angegeben wird. Das Minimum der Aufmerksamkeit erlangt man leicht, wenn man die Aufgabe möglichst schnell durchläuft, ohne die geringste Gewifsheit von der Richtigkeit der Berechnung. Endlich wird man als Zwischenstadium zwischen den beiden Grenzen passend das Verfahren benutzen können, das bei allen unseren vorhergehenden Versuchen zur Anwendung kam, indem man nämlich die Aufgabe sicher rechnet, ohne jedoch darauf auszugehen, sich des Fazits zu erinnern. Wir betrachten nun eine Versuchsreihe, die sämtliche drei genannte Fälle umschliefst.

Pl. XXIII, B. d. 14/10. A. L. Arbeit I: 8372 × 17. Arbeit II: 4591 × 18. Sehr flüchtig durchgerechnet.

	A_s	A_v	$A_s - A_v$	M
Arbeit I	56,7	46,5	10,2	0,18
» II	26,4	21,4	5,0	0,19

Pl. XXIII, C. d. 14/10. A. L. Arbeit I: 8392 × 17. Arbeit II: 7654 × 18. Sicher gerechnet ohne Erinnerung des Fazits.

	A_s	A_v	$A_s - A_v$	M
Arbeit I	53,9	39,4	14,5	0,27
» II	39,9	25,1	14,8	0,37

Pl. XXIII, D. d. 14/10. A. L. Arbeit I: 4672 × 18. Arbeit II: 3791 × 17. Die Fazite richtig angegeben.

	A_s	A_v	$A_s - A_v$	M
Arbeit I	92,5	48,2	44,3	0,48
» II	68,9	33,5	35,4	0,51

Diese Versuche sind in mehreren Beziehungen interessant. Da die Aufgaben in allen Fällen gleicher Art und möglichst gleicher Schwierigkeit waren, lassen die verschiedenen Resultate sich direkt miteinander ver-

gleichen. Es erweist sich nun erst, wie zu erwarten stand, dafs die Werte von M mit dem Grade der zur Lösung der Aufgabe angewandten Aufmerksamkeit variieren. M wird am kleinsten bei dem flüchtigen Durchrechnen, am gröfsten bei dem sorgfältigen Ausrechnen mit Erinnerung des Fazits. Zwischen diesen Grenzen liegt der dritte Fall, und der Unterschied zwischen den Werten von M ist kein geringer; das Maximum ist fast dreimal so grofs als das Minimum.

Ganz von unseren theoretischen Erwartungen abgesehen, kann dieses Resultat uns durchaus nicht in Erstaunen setzen; dasselbe wurde schon längst auf einem ganz anderen Wege als dem hier eingeschlagenen experimentell festgestellt. In einer sehr sorgfältigen Untersuchung über »Ablenkbarkeit und Gewöhnungsfähigkeit«[1] wies R. Vogt, der norwegische Psychiater, nach, wie die verschiedenen psychischen Arbeiten in höchst verschiedenem Grade dadurch beeinflufst werden, dafs man zugleich andere, mehr mechanische Arbeiten ausführt. Als störende Nebenarbeiten wurden die Reaktion gegen bestimmte Schläge des Metronoms, das Hersagen auswendig gelernter Gedichte u. dgl. angewandt. Die Hauptarbeiten, die untersucht wurden, waren teils Wahrnehmungen (das Auffassen sinnloser Silben oder einzelner Buchstaben eines Textes), teils Additionen von Zahlenreihen, teils das Auswendiglernen von Zahlen oder Silben. Als Mafs für den störenden Einflufs der Nebenarbeit auf die Hauptarbeit benutzte Vogt das Verhältnis zwischen dem Quantum Arbeit, das geleistet wurde, wenn keine Störung stattfand, und derjenigen Menge, die geliefert wurde, wenn zugleich die störende Nebenarbeit vorging. Es erwies sich nun hierdurch, dafs die blofse sinnliche Wahrnehmung durch eine gleichzeitige Nebenarbeit gar nicht beeinflufst wurde; dagegen trat bei den logisch-associativen Prozessen, auf denen das Rechnen mit Zahlen beruht, eine Störung deutlich hervor, und diese wurde überdies um so gröfser, je gröfsere Forderungen an das Gedächtnis gestellt wurden. Ihr Maximum erreichte die Störung bei der reinen Gedächtnisarbeit, dem Auswendiglernen.

[1] Kraepelin: Psychologische Arbeiten. Bd. III. S. 62 u. f.

Es ist leicht zu ersehen, dafs die Reihenfolge, die Vogt für die verschiedenen psychischen Arbeiten fand, ganz dieselbe ist, die oben mittels der Verminderung der körperlichen Arbeit nachgewiesen wurde. In der That untersuchten Vogt und ich dieselben Erscheinungen; nur wandten wir auf den gegenseitigen Einflufs der Haupt- und der Nebenarbeit verschiedenes Mafs an. Wir bestimmen beide, um wieviel die Menge der Hauptarbeit dadurch vermindert wird, dafs die Nebenarbeit gleichzeitig stattfindet; der Unterschied ist nur der, dafs sowohl Haupt- als Nebenarbeit bei Vogt psychischer Art war, während ich als Hauptarbeit körperliche Leistungen vorzog. Thatsächlich wird also die Wechselwirkung der beiden Arbeiten gemessen, und das Resultat wird daher ganz natürlich dasselbe. Ob man die eine oder die andere Methode vorzieht, möchte wohl zunächst davon abhängen, was man aufzuklären wünscht. Hier, wo es sich nur um die Feststellung der Reihenfolge der verschiedenen psychischen Arbeiten handelt, ist diese Frage jedenfalls ohne allen Belang, da beide Methoden zu genau demselben Resultate führen. Wir können deshalb, da die Richtigkeit des Resultats auf zweifache Weise verbürgt ist, folgenden Satz aufstellen:

Die relative Arbeitsverminderung wird um so gröfser, je mehr die psychische Arbeit die Aufmerksamkeit beansprucht. Namentlich erweist es sich, dafs vorzüglich die Gedächtnisarbeit die Konzentration der Aufmerksamkeit erheischt, weshalb diese Art Arbeit auch die gröfste Verminderung der körperlichen Arbeit bewirkt.

Noch ein anderer wichtiger Schlufs läfst sich aus der angegebenen Versuchsreihe ableiten. Vergleichen wir nämlich die für die beiden Arbeiten in demselben Ergogramme gefundenen Werte von M miteinander, so zeigt sich ein wesentlicher Unterschied in der Genauigkeit der Bestimmungen bei den verschiedenen Graden der Aufmerksamkeit. Beim Minimum der Aufmerksamkeit fanden wir für M 0,18 und 0,19; beim Maximum 0,48 und 0,51. In beiden diesen Fällen stimmen die beiden Werte so gut miteinander überein, wie es sich

überhaupt nur irgend erwarten liefs. Denn kleine Zufälligkeiten sind bei diesen Versuchen ja keineswegs ausgeschlossen. Selbst wenn die Rechenaufgaben so gemacht sind, dafs sie gleiche Schwierigkeiten darzubieten scheinen, kann man doch nicht sicher sein, dafs nicht einzelne der darin vorkommenden Multiplikationen der V-P leichter fallen als andre. Kommt hierzu noch ferner die ganz unberechenbare gröfsere oder geringere Aufgelegtheit u. dgl., so wird es einleuchten, dafs man identische Zahlen in zwei Versuchen dieser Art nicht erwarten darf. So kleine Unterschiede wie die oben gefundenen (0,01 und 0,03) fallen ganz gewifs innerhalb der Grenzen der zufälligen Fehler, und wir finden bei diesen beiden Graden der Aufmerksamkeit also wirklich konstante Werte von *M*. Anders verhält es sich dagegen im dritten Falle, der eine nicht näher bestimmbare Zwischenstufe zwischen dem Maximum und dem Minimum der Aufmerksamkeit repräsentiert. Man besitzt, wie oben gesagt, durchaus kein Mittel, um sicher zu gehen, dafs man genau denselben Grad der Aufmerksamkeit hervorbringt, sobald es sich nicht um das Maximum oder das Minimum handelt. Der Versuch zeigt denn auch, dafs wir gerade in diesem Falle ziemlich grofse Differenzen zwischen anscheinend ganz gleichartigen Arbeiten erhalten; jedenfalls ist der Unterschied zwischen 0,27 und 0,37 zu grofs, um als rein zufälliger Fehler betrachtet werden zu können. Und selbst wenn dieser Fehler ungewöhnlich grofs ist, zeigen doch alle unsere früheren, auf dieselbe Weise ausgeführten Messungen, dafs der Unterschied zwischen den zusammengehörenden Werten von *M* durchgängig zwischen 0,05 und 0,08 liegt. Es geht also hieraus hervor, dafs die Art und Weise, wie die psychische Arbeit bei allen diesen früheren Versuchen ausgeführt wurde, streng genommen so ungeeignet war, wie nur irgend möglich. Da nichtsdestoweniger bestimmte Gesetzmäfsigkeiten deutlich zum Vorschein kommen, fand ich mich nicht bewogen, die Versuche zu verwerfen.

Wir verstehen jetzt also, weshalb die zusammengehörenden Werte von *M* bei allen vorhergehenden Versuchen durchweg ziemlich grofse Abweichungen zeigen; dies liegt ganz einfach daran, dafs es nicht

möglich ist, denselben Grad der Aufmerksamkeit herzustellen, wenn nicht entweder das Maximum oder das Minimum verlangt wird. Hierin liegt nichts Sonderbares; seit den ersten Tagen der psychophysischen Versuche weifs man dies, weshalb man stets das Maximum der Aufmerksamkeit verlangt, da man sich hierdurch nicht nur einen konstanten Grad der Aufmerksamkeit, sondern auch zugleich die genaueste Auffassung der zu beobachtenden Erscheinung sichert. Es erübrigt noch die Erklärung, weshalb der gröfsere Wert von *M* fast immer der Arbeit II zufällt. Wenn der Grad der Aufmerksamkeit von einem Versuche zum anderen variiert, müfste man eigentlich erwarten, den gröfseren Wert von *M* ebenso häufig in Arbeit I als in Arbeit II zu finden; es zeigt sich indes empirisch, dafs dies nicht der Fall ist. Die Frage ist also die: weshalb wurde Arbeit II durchweg mit gröfserer Aufmerksamkeit ausgeführt als Arbeit I? Die Selbstbeobachtung beantwortet diese Frage auf sehr befriedigende Weise. Nach Ausführung der Arbeit I hat man das Gefühl, dafs man die Aufgabe nicht mit so grofser Sicherheit gelöst hat, wie man es hätte thun können. Dies »Gefühl« ist ganz richtig, denn da die Aufmerksamkeit nicht maximal konzentriert war, müfste man bei gespannterer Aufmerksamkeit gröfsere Sicherheit erreichen können. Da nun stets das sichere Ausrechnen der Aufgabe verlangt wurde, strengt man sich unwillkürlich bei der Arbeit II gründlicher an, eben weil man erkennt, dafs man das erste Mal vielleicht nicht ganz befriedigend arbeitete. Und da zwischen den einzelnen Ergogrammen wegen der Ermüdung der Muskeln gewöhnlich eine Pause von etwa einer Stunde gemacht werden mufs, wiederholt sich dasselbe beim nächsten Doppelversuche, weil man aufser stande ist, den zuletzt angewandten Grad der Aufmerksamkeit in der Erinnerung festzuhalten. Es wird daher verständlich, dafs man bei der Arbeit II fast immer gründlicher, mit etwas mehr gespannter Aufmerksamkeit, als bei Arbeit I arbeiten wird, und somit ist der gröfsere Wert von *M* gegeben.

Eine rein praktische Konsequenz hiervon ist es, dafs man bei vergleichenden Versuchen dieser Art, wo es auf gröfsere Genauigkeit ankommt, stets entweder mit

dem Maximum oder dem Minimum der Aufmerksamkeit arbeiten sollte. Gleich im Folgenden werden wir hiervon Gebrauch machen.

Wir haben jetzt gesehen, wie die relative Arbeitsverminderung mit der psychischen Arbeit variiert; es erübrigt noch die Untersuchung, ob sie nicht auch von der körperlichen Arbeit, speziell von dem Takte, in welchem diese ausgeführt wird, abhängig ist. Bei allen angeführten Messungen war der Takt beständig 40 pr. Min., und die Zahlen lassen sich deshalb miteinander vergleichen, weil sie unter diesen Verhältnissen von der psychischen Arbeit allein abhängig werden. Es ist nun die Frage, ob diese Zahlen nur relative Bedeutung haben, so dafs man bei einem anderen Takte andere Zahlengröfsen finden würde, oder ob die gefundenen Werte des *M* von dem zufällig gewählten Takte unabhängig sind, so dafs sie als konstante Mafse der ausgeführten psychischen Arbeiten Bedeutung erhalten. Wie es sich hiermit verhält, kann natürlich nur durch Versuche entschieden werden, von deren wahrscheinlichem Ausfalle wir uns indes a priori eine Vorstellung zu bilden vermögen. Solange der Takt so schnell ist, dafs die psychische und die körperliche Arbeit gleichzeitig ausgeführt werden müssen, kann der Takt keinen Einflufs erhalten. Jede einzelne Partialarbeit mufs in diesem Falle um eine bestimmte, von der gleichzeitig ausgeführten psychischen Arbeit abhängige Gröfse vermindert werden, und die relative Verminderung der gesamten körperlichen Arbeit wird mithin konstant, ganz davon unabhängig, ob in einem mehr oder weniger schnellen Takte gearbeitet wird. Anders dagegen, wenn der Takt so langsam wird, dafs man sich in der Hauptsache nur mit der psychischen Arbeit zu beschäftigen hat, während die körperliche blofs als kurze, regelmäfsige Störung eintritt. In letzterem Falle mufs die relative Arbeitsverminderung zweifelsohne viel geringer werden als im ersteren, eben weil man während der längeren zeitlichen Zwischenräume ziemlich ungestört arbeiten kann und nur in einem einzelnen Momente die Aufmerksamkeit auf die störend eingreifende körperliche Arbeit zu richten braucht. Die beiden verschiedenartigen Arbeiten werden hier zunächst abwechselnd

ausgeführt, so daſs sie in weit geringerem Grade aufeinander zu influieren vermögen.

Daſs diese Betrachtungen richtig sind, geht aus den Versuchen nun auch deutlich hervor. Ich führe erst zwei Ergogramme an, die zur Illustration des Einflusses dienen, welchen ein geringer Unterschied des Taktes auf die relative Arbeitsverminderung erhält.

Pl. XXIV, A. d. 10/10. A. L. Takt 30 pr. Min. Arbeit I: 52941 × 14; Arbeit II: 64783 × 13. Beide Arbeiten möglichst schnell durchgerechnet.

	A_s	A_r	$A_s - A_r$	M
Arbeit I	58,2	45,1	13,1	0,22
» II	37,2	29,8	7,4	0,20

Pl. XXIV, B. d. 10/10. A. L. Takt 40 pr. Min. Arbeit I: 64783 × 14; Arbeit II: 52941 × 13. Beide Arbeiten möglichst schnell durchgerechnet.

	A_s	A_r	$A_s - A_r$	M
Arbeit I	68,8	57,9	10,9	0,16
» II	34,3	27,3	7,0	0,20

In diesen Versuchen wurde, wie angegeben, ein Minimum der Aufmerksamkeit bei den psychischen Arbeiten angewandt, um möglichst konstante Werte zu erhalten. Die Schwankungen von M innerhalb der einzelnen Versuchsgruppen sind denn auch nicht groſs, 0,04, bzw. 0,02. Diese Gröſsen, die also als zufällige Fehler zu betrachten sind, übersteigen die Abweichung zwischen den beiden Gruppen. Der mittlere Wert von M in den beiden Versuchsgruppen ist nämlich 0,21, bzw. 0,18, die Differenz derselben 0,03. Das heiſst mit anderen Worten, daſs der verschiedene Takt keinen nachweisbaren Unterschied der relativen Arbeitsverminderung bewirkt hat, was mit unseren oben angestellten Betrachtungen völlig übereinstimmt. Nehmen wir dagegen einen sehr langsamen Takt, so stellt sich die Sache anders. Die V-P selbst merkt den langsamen Takt als eine Erleichterung, indem es nun keine Schwierigkeit bereitet, sogar gröſsere Rechenaufgaben vollständig zu lösen und das Fazit zu behalten. Trotzdem werden die Werte von M sehr klein.

Pl. XXIV, C. d. 31/3. A. L. Takt 12 pr. Min. Aufgabe 657×34; vollständig ausgerechnet mit Angabe des Fazits.

$A_s = 71{,}3 \quad A_v = 55{,}8 \quad A_s - A_v = 15{,}5 \quad M = 0{,}22$

Pl. XXIV, D. d. 10/3. Dr. B. Takt 12 pr. Min. Arbeit I: 657×34; Arbeit II: 392×43; Arbeit III: 876×35. Alle drei Arbeiten ausgerechnet mit Angabe des Fazits.

	A_s	A_v	$A_s - A_v$	M
Arbeit I	51,1	42,3	8,9	0,17
» II	41,5	31,4	10,1	0,24
» III	44,3	33,3	11,0	0,25

Vergleichen wir diese Bestimmungen mit den Ergogrammen Pl. XXII, A und B, wo Aufgaben von derselben Schwierigkeit bei einem Takte von 40 pr. Min. gelöst wurden (siehe S. 206—8), so zeigt es sich, dafs der Wert von *M* bei dem langsameren Takte bis auf die Hälfte oder ein Drittel des Wertes bei dem schnelleren Takte sinkt. Und bei dem langsameren Takte bleibt obendrein das Fazit im Gedächtnisse, was sich in dem anderen Falle als unmöglich erwies. Wären die Aufgaben in beiden Fällen auf dieselbe Weise gelöst worden, so würden die Werte von *M* einen noch gröfseren Unterschied zeigen. Soll die relative Arbeitsverminderung als Mafs für die psychische Thätigkeit zu gebrauchen sein, so mufs man also dafür sorgen, den Takt so schnell zu nehmen, dafs die psychische und die körperliche Arbeit wirklich gleichzeitig ausgeführt werden. Bleibt diese Bedingung unerfüllt, so werden die beiden Arbeiten, die physische und die psychische, zunächst abwechselnd ausgeführt werden, und ihr gegenseitiger Einflufs aufeinander ist dann sehr gering.

Die relative Arbeitsverminderung, die eine gegebene psychische Thätigkeit bewirkt, ist unabhängig vom Takte, von dem zeitlichen Zwischenraum zwischen den einzelnen Partialarbeiten, wenn dieser nur so kurz gemacht wird, dafs die körperliche und die psychische Arbeit gleichzeitig vorgehen. Wird die Pause dagegen so lang, dafs die Aufmerksamkeit konstant auf die psychische Arbeit

konzentriert werden kann und nur in einzelnen Momenten auf die körperliche gerichtet ist, so wird die Arbeitsverminderung sehr klein und läfst dieselbe sich schwerlich als Mafs der psychischen Thätigkeit anwenden.

Verschiedene Versuche einer Erklärung. Die gesetzmäfsige Weise, wie die relative Arbeitsverminderung mit der psychischen Thätigkeit variiert, macht es ganz unzweifelhaft, dafs die Bewufstseinserscheinungen auf irgend eine Art die Arbeitsverminderung bewirken. Es wird also die Frage, wie diese Einwirkung zu stande kommt. Hier gibt es verschiedene Möglichkeiten. Ein Weg, auf dem die Einwirkung möglicherweise vorgehen könnte, sind die durch die psychische Thätigkeit hervorgebrachten Störungen des Blutumlaufs. In der Einleitung wurde erwähnt, dafs Féré glaubt, eine Übereinstimmung zwischen der Arbeitsänderung und der Änderung des Volumens des Armes, die von einer gegebenen psychischen Thätigkeit herrührt, gefunden zu haben. Nun ist diese Übereinstimmung allerdings ein reines Postulat, für welches durchaus kein Beweis geführt wird, und überdies ist die Erklärung eine höchst unwahrscheinliche, da es weit näher liegt, zwischen den zentralen Prozessen (der motorischen Innervation und dem psychophysiologischen Vorgang) eine direkte Wechselwirkung anzunehmen; nur auf Grundlage apriorischer Vermutungen läfst die Möglichkeit sich aber doch nicht abweisen. Es ist also zu untersuchen, ob die plethysmographisch nachgewiesenen Veränderungen des Blutumlaufs im Arm möglicherweise die Ursache der Verminderung der Muskelarbeit sein könnten.

Die sicherste Entscheidung dieser Frage wird auf experimentellem Wege zu erreichen sein, indem gleichzeitig Plethysmogramme und Ergogramme von derselben Hand aufgenommen werden. Die praktischen Schwierigkeiten, die hier eintreten könnten, lassen sich leicht überwinden. Nichts verwehrt uns, einen Plethysmographen an beiden Enden offen zu machen, so dafs er um den Arm geführt werden könnte und die Hand frei liefse; somit wäre es also möglich, ein Plethysmogramm des gleichzeitig am Ergographen arbeitenden

Armes aufzunehmen. Es ist aber nicht nötig, einen derartigen Versuch anzustellen, denn wir haben bereits hinlängliche Erfahrungen, dafs kein brauchbares Resultat herauskommt. Jede noch so kleine Bewegung des im Plethysmographen eingeschlossenen Arms bewirkt der Erfahrung gemäfs Volumschwankungen, welche die durch Veränderungen des Blutumlaufs bewirkten weit übersteigen. Wollte man daher ein Plethysmogramm aufnehmen, während zugleich die Muskeln der Hand maximal angespannt würden, so würde das Plethysmogramm nur die Volumveränderungen der Muskeln zeigen, und alle anderen Veränderungen würden völlig verwischt werden. Es würde deshalb auch unmöglich zu ersehen sein, welche Veränderung des Armvolumens eine gleichzeitige psychische Arbeit hervorriefe. Eine direkte experimentelle Beantwortung der Frage vermögen wir also nicht zu erzielen.

Glücklicherweise bedürfen wir, meines Erachtens, auch keines neuen empirischen Materials, um die Sache zu entscheiden; unser Wissen ist völlig genügend, um hier sichere Schlüsse ziehen zu können. In dem arbeitenden Arm sind die Gefäfse gespannt, stark mit Blut angefüllt, und die Zirkulation ist lebhaft. Die Ausführung einer psychischen Arbeit bewirkt Veränderungen des Armvolumens, deren gesetzmäfsiger Verlauf uns wohlbekannt ist (vgl. I. Teil. S. 62—69). Sollen diese Volumveränderungen nun die Verminderung der körperlichen Arbeit verursachen, so leuchtet es ein, dafs sie wenigstens mit der verursachten Arbeitsverminderung gleichzeitig sein müssen, und jedenfalls nicht später als diese eintreten dürfen. Alle unsere Ergogramme zeigen indes, dafs die Arbeitsverminderung in demselben Momente beginnt, da die Aufmerksamkeit auf die psychische Arbeit gerichtet wird. Sogleich nach Anfang der letzteren zeigt die erste Partialarbeit eine Verminderung, so dafs die längste Zeit, die zwischen dem Anfang der psychischen Thätigkeit und deren Äufserung im Ergogramme verflossen sein kann, also der Zeitraum zwischen zwei Partialarbeiten, bei allen unseren Versuchen höchstens 1,5 Sek. beträgt. Meistens wird die Zeit doch wahrscheinlich nur Bruchteile einer Sekunde betragen. Alle unsere Plethysmogramme (vgl. I. Teil, Atlas, Tab. XV

bis XVII) zeigen aber, daſs mehrere, durchschnittlich 3—4 Sekunden verlaufen, bis sich eine Verminderung des Armvolumens spüren läſst. Es muſs deshalb als unmöglich betrachtet werden, daſs die Veränderungen des Blutzuflusses nach dem Arm die Ursache der Arbeitsverminderung sein können, denn diese tritt mehrere Sekunden früher ein, als die Störungen des Blutumlaufs sich nachweisen lassen. Hierzu kommt noch ein anderer Umstand. Genau in dem Augenblick, da die psychische Arbeit vollendet ist, steigen die Partialarbeiten wieder, was aus allen unseren Ergogrammen hervorgeht. Die Plethysmogramme zeigen aber keine besondere Volumveränderung in demselben Momente. Mitunter hat der Arm lange vor der Beendigung der psychischen Arbeit sein normales Volumen erreicht; mitunter befindet sich das Armvolumen beim Aufhören der psychischen Arbeit in allmählichem Steigen, man findet aber nie eine jähe Volumveränderung in diesem Augenblick. Wie ist es möglich, daſs die Zirkulationsveränderungen die plötzliche Vermehrung der körperlichen Arbeit verursachen können, wenn solche Veränderungen gar nicht in dem Moment, da die Arbeitsvermehrung eintritt, vorgehen? Von einem Kausalitätsverhältnisse zwischen diesen beiden Erscheinungen kann offenbar gar keine Rede sein.

Da zwischen den Störungen des Blutumlaufs im Arm und den Veränderungen der Gröſse der körperlichen Arbeit, die durch eine gegebene psychische Thätigkeit hervorgerufen werden, durchaus keine zeitliche Übereinstimmung stattfindet, können die Änderungen der Arbeit nicht durch Schwankungen der Ernährung der arbeitenden Muskeln verursacht sein.

Nach diesem Ergebnisse steht eigentlich nur die Möglichkeit offen, daſs der zentrale psychophysiologische Prozeſs auf irgend eine Weise die motorische Innervation direkt hemmt, was natürlich eine Verminderung der Muskelarbeit zur Folge hat. Welchen Gesetzen gemäſs diese Hemmung vorgeht, und wie sie überhaupt zu stande kommt, wird im Folgenden die Aufgabe unserer Untersuchung werden. Da man von den zentralen Prozessen aber so äuſsert wenig Zuverlässiges

weiſs, wollen wir den Anfang damit machen, daſs wir eine psychologische Erklärung der Erscheinung suchen, die uns möglicherweise den zu Grunde liegenden physiologischen Prozessen auf die Spur bringen kann.

Eine psychologische Erklärung der besprochenen Thatsachen würden wir erlangt haben, wenn es uns nachzuweisen glückte, daſs die Variationen der relativen Arbeitsverminderung sich als einfache Konsequenzen aus bekannten Gesetzen für irgend eine psychische Thätigkeit ableiten lieſsen. Die psychische Thätigkeit, von der hier die Rede sein kann, ist wohl keine andere als die Aufmerksamkeit; wir haben ja direkt nachgewiesen, daſs die relative Arbeitsverminderung, *M*, um so gröſser wird, je mehr die Aufmerksamkeit sich auf eine gegebene psychische Arbeit konzentriert. *M* scheint aber doch nicht ausschlieſslich von der Aufmerksamkeit abhängig zu sein, denn wir fanden ja ebenfalls, daſs *M* um so gröſser wird, je schwieriger die psychische Arbeit ist. Näher betrachtet haben wir hier jedoch mit gar keinem neuen Faktor zu thun, denn daſs eine psychische Arbeit schwieriger ist als eine andere, bedeutet nur, daſs sie gröſsere Anspannung, d. h. stärkere Konzentration der Aufmerksamkeit erfordert. In wie hohem Grade eine Arbeit die Aufmerksamkeit beansprucht, das ist also teils von der Natur der Arbeit abhängig, teils aber auch von den mannigfachen, subjektiven Momenten, die wir in eine einzige Bezeichnung: »das Interesse« zusammenfassen können. Genauer können wir das Verhältnis so ausdrücken: der Grad der Aufmerksamkeit ist eine Funktion zweier unabhängiger Variabeln, nämlich der Art der Arbeit und des Interesses des Individuums. Beide diese Gröſsen können, wie leicht zu ersehen, ganz voneinander unabhängig variieren, und somit variiert auch der Grad der Aufmerksamkeit. Je gröſser das Interesse ist, mit dem man sich an eine gegebene Arbeit macht, um so mehr wird sich die Aufmerksamkeit auf dieselbe konzentrieren; bei konstantem Interesse bewirken die verschiedenen Arbeiten verschiedene Konzentration der Aufmerksamkeit. Von dieser Auffassung aus ist es verständlich, daſs wir für den Grad der willkürlichen Aufmerksamkeit und die Schwierigkeit der verschiedenen

psychischen Arbeiten ein gemeinschaftliches Maſs, die Gröſse *M*, haben können. Schon der Umstand, daſs diese Verhältnisse kommensurabel sind, zeigt deutlich genug, daſs es hier ein gemeinschaftliches Begründendes geben muſs. Dieses Gemeinschaftliche ist also, der hier aufgestellten Auffassung zufolge, die Aufmerksamkeit, deren Konzentrationsgrad durch alle beide genannten Verhältnisse im Verein bestimmt wird. Und da experimentell nachgewiesen ist, daſs die relative Arbeitsverminderung von dem Grade der Aufmerksamkeit abhängt, wird dieselbe folglich auch von den Verhältnissen abhängig, welche den Grad der Aufmerksamkeit bestimmen, mithin zugleich ein Maſs für diese Verhältnisse. Hierdurch wird es also verständlich, daſs wir *M* früher als Maſs für die Schwierigkeit der verschiedenen psychischen Arbeiten anwenden konnten.

Wir können leicht einen klaren Überblick über die Verhältnisse erhalten, wenn wir alle im Vorhergehenden angegebenen Bestimmungen von *M* in einem einzigen Schema sammeln. Dieses ist in der Tab. 33 gegeben, welche die Mittel der von der V-P A. L. ausgeführten Messungen enthält. Die Kolonne links gibt die verschiedenen Arten der Arbeit an, nach abnehmender Schwierigkeit von oben abwärts geordnet. In den wagerechten Reihen sind die drei verschiedenen Grade der Aufmerksamkeit angeführt, die sich überhaupt zum Gegenstand der Untersuchung machen lassen, und jede einzelne Rubrik enthält das Mittel der ausgeführten Bestimmungen nebst dem mittleren, den Bestimmungen anhaftenden Fehler. So bezeichnet z. B. $0{,}58 \pm 0{,}04$, daſs $M = 0{,}58$, und daſs die mittlere Schwankung der einzelnen Bestimmungen 0,04 ist. Die darunter stehenden ganzen Zahlen bezeichnen die Anzahl der Messungen, deren Mittel genommen wurde. Zur Berechnung der Tabelle benutzte ich das gesamte Versuchsmaterial, das mir überhaupt hinsichtlich der betreffenden V-P zur Verfügung stand: vieles wurde hier also mitgenommen, das in den beigeschlossenen Planen nicht wiedergegeben ist und also auch nicht im Vorhergehenden besprochen wurde [1].

---

[1] Diese kleine Tabelle ist natürlich nur als erster Entwurf zu einer Messung der verschiedenen psychischen Thätigkeiten zu be-

Aus der Tab. 33 geht nun erstens der früher erwähnte Unterschied der Genauigkeit der Bestimmungen hervor. Beim Maximum und Minimum der Aufmerksamkeit — den beiden Graden, die sich mit Sicherheit festhalten lassen — ist der mittlere Fehler nur klein und annähernd eine konstante Gröſse. Bei den dazwischenliegenden Graden, die sich nicht präzisieren lassen, und die deshalb von Versuch zu Versuch wechseln, wird der mittlere Fehler demgemäſs durchweg viel gröſser. Was für uns indes die gröſste Bedeutung hat,

---

trachten; hier ist noch viel auszurichten. Ich suchte z. B. zu bestimmen, eine wie groſse Arbeitsverminderung das bloſse Behalten eines Rechnungsfazits bewirkt. Hierbei ging ich von folgender Betrachtung aus. Da es möglich ist, eine Aufgabe sicher zu rechnen und das Fazit zu behalten, muſs es auch möglich sein, flüchtig zu rechnen und die herausgekommenen Zahlen zu behalten. Bewirkt nun die reine Gedächtnisarbeit eine bestimmte Arbeitsverminderung, so sollte also der Umstand, daſs man das Fazit behält, in beiden Fällen die gefundene Arbeitsverminderung um eine konstante Gröſse vermehren. Um dies zu prüfen, versuchte ich es, eine Aufgabe (Addition von vier dreistelligen Zahlen) möglichst schnell zu lösen, zugleich aber das Fazit zu behalten. Dies war schwer, weil die beiden Operationen, das Rechnen und das Behalten, sehr verschiedene Anspannung der Aufmerksamkeit erforderten. Das Resultat wurde denn auch, wie zu erwarten stand, ein ziemlich unsicheres; als Mittel von zwei Versuchen erhielt ich $M = 0{,}17 \pm 0{,}05$. Wird diese Gröſse mit den in Tab. 33 angeführten Zahlen für dieselbe Art Arbeit zusammengestellt, so bekommen wir folgendes Schema:

	ohne Behalten	mit Behalten	Differenz
flüchtig gerechnet	0,10	0,17	0,07
sicher gerechnet	0,19	0,26	0,07

Die Gedächtnisarbeit scheint also, ohne Rücksicht darauf, wie man rechnet, die Arbeitsverminderung um eine konstante Gröſse zu vermehren, die mithin das Maſs für die Gedächtnisarbeit selbst wird. Diese wird natürlich um so gröſser, je mehr zu behalten ist, und man wird folglich durch Zahlen angeben können, wie die Arbeit mit der Menge des zu behaltenden Stoffes anwächst. Es war meine Absicht, diese Untersuchung weiter zu führen, aus Eifer und Interesse für die Versuche strengte ich meine linke Hand aber so übermäſsig an, daſs ich jetzt nicht im stande bin, ein Ergogramm ohne starke Schmerzen im Arm auszuführen. Vorläufig habe ich deshalb weitere Versuche einstellen müssen, welches traurige Faktum ich nur anführe, um anderen Forschern Vorsicht zu empfehlen. Nicht zu viele Ergogramme täglich, und kundige Behandlung der Hand und des Arms mit Massage nach jedem Ergogramm, es sei denn, daſs man gerade die remanente Ermüdung zu untersuchen wünsche.

Tab. 33.

Art der Arbeit	Die Aufmerksamkeitskonzentrationen		
	Minimum	unbestimmte Zwischenstufe	Maximum
Multiplikation 3-stelliger Zahlen mit 2-stelligen über 20	0,21 ± 0,02 2	0,58 ± 0,04 2	
Multiplikation mehrstelliger Zahlen mit 2-stelligen unter 20	0,19 ± 0,015 6	0,32 ± 0,05 2	0,50 ± 0,015 2
Addition von sechs 5-stelligen Zahlen	0,18 ± 0,02 3	0,31 ± 0,04 4	
Addition von vier 3-stelligen Zahlen	0,10 ± 0,013 3	0,19 ± 0,03 3	0,26 ± 0,005 2

ist die aus der Tabelle klar hervorgehende Thatsache, dafs jede psychische Arbeit einen Grad der Aufmerksamkeit erfordert, der ausschliefslich durch die Natur der Arbeit bestimmt wird und von der durch das Interesse bestimmten willkürlichen Konzentration der Aufmerksamkeit ganz unabhängig ist. Die Tab. 33 zeigt nämlich, dafs selbst wenn die Aufmerksamkeit im Minimum ist, *M* dennoch mit der Schwierigkeit der Arbeit zunimmt. Es gelingt also gar nicht, eine bestimmte psychische Arbeit auszuführen, wenn man derselben nicht einen gewissen, mit der Schwierigkeit der Arbeit variierenden Grad der Aufmerksamkeit schenkt. Oder mit anderen Worten: man sieht, dafs das Minimum der Aufmerksamkeit nur so lange eine konstante Gröfse ist, wie es sich um eine Arbeit ganz bestimmter Beschaffenheit handelt; verändert sich die Art der Arbeit, so variiert hiermit auch das Minimum der Aufmerksamkeit, ohne welches die Arbeit sich überhaupt nicht ausführen läfst. Wir können nun also feststellen:

Der Wert, den *M* bei der Ausführung einer gegebenen psychischen Arbeit annimmt, ist ausschliefslich von dem Grade der Aufmerksamkeit abhängig, mit welchem die Arbeit ausgeführt wird, weshalb er sich als Mafs dieses Grades anwenden läfst. Der Grad der Aufmerksamkeit ist wieder bestimmt teils durch die Natur der Arbeit, indem jede ein-

zelne Arbeit ein notwendiges Minimum erheischt, und teils durch das Interesse, das eine vermehrte Konzentration der Aufmerksamkeit bewirkt.

Da die relative Arbeitsverminderung mithin ausschliefslich von der Aufmerksamkeit abhängig ist, lautet die Frage also, ob wir aus den bekannten Gesetzen für die Aufmerksamkeit die Thatsache ableiten können, dafs die körperliche Arbeit abnimmt, wenn gleichzeitig eine psychische Arbeit ausgeführt wird. Aufserdem sollte es zu erklären sein, weshalb die körperliche Arbeit um so geringer wird, je mehr die Aufmerksamkeit sich auf die psychische richtet. Eine solche psychologische Erklärung zu geben, scheint nun auch nicht schwer zu sein. Denn, wie wir wissen, äufsert sich die Aufmerksamkeit besonders dadurch, dafs sie durch ihre Konzentration auf einzelne Vorstellungen andere aus dem Bewufstsein verdrängt, und dafs sie durch ihre Verteilung unter mehrere Bewufstseinszustände jeden derselben weniger klar hervortreten läfst. Dieses Verhalten ist bisher zwar nur rücksichtlich der eigentlichen Bewufstseinszustände, der Vorstellungen und Gefühle, nachgewiesen, indes liegt die Annahme nahe, dafs dasselbe auch von anderen zentralen Erscheinungen, u. a. also von den motorischen Innervationen der willkürlichen Muskeln gilt. Es wird um so mehr berechtigt, dem Gesetze auch auf diesem Gebiete Gültigkeit beizulegen, da die Innervation der willkürlichen Muskeln nach der wahrscheinlichsten Erklärung gerade auf die Weise zu stande kommt, dafs die Aufmerksamkeit sich auf ein Bewegungsbild, auf das muskuläre Erinnerungsbild früher ausgeführter Muskelbewegungen konzentriert. Ist diese Auffassung richtig, so ist hiermit ganz gewifs auch die Erklärung aller im Vorhergehenden nachgewiesenen Thatsachen gegeben. Wenn die maximale Innervation einer bestimmten Muskelgruppe die volle Konzentration der Aufmerksamkeit auf ein Bewegungsbild erfordert, so leuchtet es ein, dafs man die Aufmerksamkeit nicht zugleich auf eine psychische Arbeit gerichtet halten kann, ohne die Innervation — und somit die ausgeführte Muskelarbeit — zu vermindern. Und zugleich ist es klar, dafs je mehr die

Aufmerksamkeit auf die psychische Arbeit gerichtet wird, folglich um so weniger Aufmerksamkeit für die körperliche Arbeit übrigbleiben kann, weshalb diese um so mehr abnehmen mufs. Demnach scheinen also die wesentlichsten unserer experimentell nachgewiesenen Thatsachen den bekannten Gesetzen für die Aufmerksamkeit direkt unterworfen zu sein. Es wird mittels einer mehr exakt mathematischen Darstellung sogar leicht nachzuweisen sein, weshalb es die relative und nicht die absolute Arbeitsverminderung werden mufs, die bei wachsender Ermüdung der Muskeln konstant ist, wenn eine konstante »Menge« Aufmerksamkeit von einer bestimmten psychischen Arbeit beansprucht wird. Ich werde mich jedoch nicht näher hierauf einlassen, denn obschon die Erklärung sich sogar in Kleinigkeiten durchführen läfst, solange von Arbeiten mit nur einer Hand die Rede ist, erweist sie sich doch beim Arbeiten mit beiden Händen als ganz unzulänglich, mithin als unhaltbar.

Wenn wir mit der einen Hand maximal arbeiten, scheint diese Arbeit die völlige Konzentration der Aufmerksamkeit zu verlangen. Dies deutet wenigstens der Umstand an, dafs eine wenn auch nur sehr geringe Zerstreuung der Aufmerksamkeit, das flüchtige Durchrechnen einer leichten Aufgabe, sogleich eine nachweisbare Arbeitsverminderung bewirkt. Die Konsequenz hiervon scheint die werden zu müssen, dafs wir nicht gleichzeitig mit beiden Händen maximal arbeiten könnten. Die Arbeit jeder einzelnen Hand müfste abnehmen, wenn die Aufmerksamkeit auf die beiden Arbeiten verteilt wird. Dies ist absurd, denn die weitere Verfolgung des Gedankens führt dahin, dafs je mehr Muskeln gleichzeitig innerviert würden, jeder einzelne um so weniger Arbeit leisten könnte, was den Erfahrungen des täglichen Lebens durchaus widerspricht. Es fällt auch nicht schwer, nachzuweisen, dafs die Arbeiten der beiden Hände durchaus voneinander unabhängig sind. Von einer kleinen Störung im Anfangsmomente abgesehen, wird die maximale Arbeit der einen Hand gar nicht auf die der anderen influieren. Ich habe mit Experimenten dieser Art nicht so gar wenig Zeit verloren, weil die psychologische Erklärung der Erscheinungen

mir so natürlich und einfach vorkam, dafs es lange dauerte, bis ich mich mit dem Gedanken versöhnte, sie sei dennoch unhaltbar. Sie fordert notwendigerweise, dafs die Arbeit der einen Hand, wenn auch nur ganz wenig, auf die der anderen Hand influiere, die Erfahrung zeigt aber das Gegenteil. Die Plane XXV—XXVII geben eine Reihe von Ergogrammen zur Aufklärung der Sache wieder. Bei diesen Versuchen benutzte ich zwei Ergographen, die dicht nebeneinander auf zwei Tischen angebracht wurden, so dafs die Richtungen der Züge an den beiden Apparaten einen Winkel von ungefähr 60° bildeten. Bringt die V-P sich nun im Scheitelpunkte des Winkels an, so wird sie bequem mit beiden Apparaten zugleich arbeiten können, und man kann die Versuche nun mannigfach variieren, um den gegenseitigen Einflufs der beiden Arbeiten aufeinander zu prüfen. Man kann z. B. anfangs beide Hände arbeiten lassen; während darauf die eine aufhört, arbeitet die andere ungestört weiter, worauf die erstere wieder anfafst. Oder auch kann man mit einer Hand allein anfangen; etwas später tritt die andere hinzu, um bald wieder aufzuhören. Endlich kann man auch mit einer Hand allein anfangen, die andere hinzutreten lassen und dann etwas später mit ersterer aufhören u. s. w. Diese verschiedenen Methoden wurden bei den Ergogrammen der Plane XXV—XXVII angewandt. Bei meinen Versuchen setzte immer die linke Hand als die geübtere die Arbeit fort, während die rechte nur in geeigneten Augenblicken hinzutrat. Wir bekommen also stets zwei zusammengehörende Ergogramme, ein ununterbrochenes für die linke und ein unterbrochenes für die rechte Hand. In den genannten Planen ist das Ergogramm der linken Hand überall unten angebracht, während das der rechten Hand in der rechten Stellung darüber steht, so dafs die gleichzeitigen Partialarbeiten in derselben Linie übereinander stehen. Ich bemerke noch, dafs die hier aufgenommenen Ergogramme nur einen sehr geringen Teil des ganzen mir zur Verfügung stehenden Materials betragen. Ich wählte diejenigen aus, welche am meisten auf einen gegenseitigen Einflufs der beiden Arbeiten deuteten; indem wir nun diese Kurven einzeln durchgehen, wird

es sich erweisen, daſs das Resultat dennoch ziemlich zweifelhaft ist.

Pl. XXV, B. d. 29/3. Fnn. Arbeit abwechselnd mit der einen und mit beiden Händen.

Pl. XXV, C. d. 10/4. Fnn. Anfangs die linke, später auch die rechte Hand.

Ich stelle diese beiden Ergogramme an die Spitze, weil sie die einzigen sind, in denen der gegenseitige Einfluſs ganz unbestreitbar ist. Diese spezielle Stellung verdanken die beiden Kurven wahrscheinlich dem Umstand, daſs die V-P noch an den Folgen der früher erwähnten Influenza litt. Diese Krankheit bewirkt gewiſs nicht so gar selten eine Schwächung des Zentralorgans, und eine solche deuten die beiden Kurven auch an. Im Pl. XXV, B zeigt sich der wechselseitige Einfluſs der beiden Arbeiten zunächst darin, daſs die Partialarbeiten im Ergogramme der rechten Hand übermäſsig klein geworden sind. Obgleich die rechte Hand nicht ermüdet war, und das Ergogramm folglich mit Partialarbeiten von annähernd derselben Höhe wie die der Partialarbeiten der linken Hand beginnen sollte, ist die Höhe dennoch durchweg weit geringer, indem die Partialarbeiten ungefähr dieselbe Gröſse haben wie die gleichzeitigen Partialarbeiten der ermüdeten linken Hand. Auſserdem zeigt das Ergogramm der linken Hand eine geringe Verminderung, solange die rechte Hand arbeitet. Pl. XXV, C gibt uns ein ganz anderes Bild. Das Ergogramm der rechten Hand beginnt hier, wie zu erwarten stand, mit Partialarbeiten derselben Gröſse wie das Ergogramm der linken Hand, und im letzteren ist auch kein Einfluſs der gleichzeitigen Arbeit der rechten Hand zu spüren, von einer geringen Senkung abgesehen, die gleich beim Eingreifen der rechten Hand zu sehen ist. Später, wenn die linke Hand aufhört, steigen die Partialarbeiten der rechten Hand aber ziemlich bedeutend. In beiden diesen Versuchen ist ein wechselseitiger Einfluſs der Arbeit der beiden Hände also unzweifelhaft, er ist allerdings aber so klein, daſs es schwer halten wird, seine Gröſse zu bestimmen. Dies hat denn auch kein groſses Interesse, da die Erscheinung rein vorübergehend war; in dem letzteren der beiden Ergogramme, das 14 Tage später

als das erstere genommen wurde, hat die Wirkung augenscheinlich schon abgenommen. Und bei den anderen Versuchspersonen, deren Ergogramme wir jetzt betrachten werden, läfst sich keine Spur von einem derartigen wechselseitigen Einflusse nachweisen.

Pl. XXVI, A. d. $^{31}/_{3}$. Dr. B. Arbeit abwechselnd mit beiden Händen und mit der linken Hand allein.

Pl. XXVI, B. d. $^{2}/_{4}$. Dr. B. Arbeit abwechselnd mit der linken Hand allein und mit beiden Händen.

Diese beiden Ergogramme sind völlig typisch, nicht nur für diese V-P, sondern auch für die folgende, A. L. Man sieht, dafs das Ergogramm der linken Hand ebenso gleichförmig und regelmäfsig ist, wie es sein würde, wenn es für sich allein ausgeführt wäre. Ob die rechte Hand zugleich arbeitet oder auch nicht, hat gar keinen Einflufs hierauf. Nur eben am Übergange, indem die rechte Hand eingreift, findet sich eine kurze Senkung im Ergogramm der linken Hand, das gleich darauf wieder bis zur normalen Höhe ansteigt. An einer einzelnen Stelle sieht man aufserdem eine kleine Störung derselben Art eintreten, indem die rechte Hand aufhört. Ganz dasselbe ist, wie gesagt, in den ziemlich zahlreichen, von A. L. ausgeführten Versuchen zu gewahren. Es liegt folglich kein Grund vor, auch für letztere V-P Kurven wiederzugeben. Die beiden Ergogramme Pl. XXVII wurden nur mitgenommen, weil sie Ausnahmen sind, die vielleicht einen geringen Einflufs andeuten könnten.

Pl. XXVII, A. d. $^{31}/_{3}$. A. L. Arbeit abwechselnd mit beiden Händen und mit der linken Hand allein.

Hier findet sich ein deutliches Steigen des Ergogramms der linken Hand während des Zeitraums, in welchem die rechte Hand nicht arbeitet. Ich glaube jedoch, dafs dieses Steigen eine rein illusorische Erscheinung ist, die nur von einer Unregelmäfsigkeit im Ergogramm der linken Hand herrührt. Man sieht nämlich, dafs das Steigen beginnt, bevor die rechte Hand mit dem Arbeiten aufhört, und es ist daher nicht besonders wahrscheinlich, dafs das Steigen hierdurch verursacht sein sollte. Wahrscheinlich hat irgend ein zufälliger Umstand die im Ergogramme der linken Hand sichtbare Senkung bewirkt, und indem diese Senkung

fast gleichzeitig damit aufhört, dafs die rechte Hand die Arbeit einstellt, hat es den Anschein, als ob dieser Umstand auf die Arbeit der linken Hand influierte. Etwas Ähnliches ist mit dem anderen Versuche der Fall.

Pl. XXVII, B. d. 2/4. A. L. Arbeit abwechselnd mit der linken Hand allein und mit beiden Händen.

Es zeigt sich hier eine kleine Senkung im Ergogramme der linken Hand während des Arbeitens der rechten Hand. Diese Senkung fängt aber später an und hört früher auf als die Arbeit der rechten Hand, so dafs ein Kausalnexus der beiden Erscheinungen wenigstens zweifelhaft ist. Das Ergebnis dieser Versuche wird also:

Maximale Arbeit der einen Hand wird nicht durch gleichzeitige maximale Arbeit der anderen Hand beeinflufst. Nur im Augenblicke des Übergangs, indem die eine Hand anfängt oder aufhört, zeigt sich meistens eine kleine Störung im Ergogramm der anderen Hand. Ein länger anhaltender gegenseitiger Einflufs der Arbeit der beiden Hände läfst sich jedenfalls mit Sicherheit nur bei Personen nachweisen, die durch Krankheit geschwächt sind.

Soweit ich zu sehen vermag, läfst dieses Ergebnis sich nicht durch das Gesetz von der Teilung der Aufmerksamkeit psychologisch erklären, da letzteres mit Notwendigkeit gegenseitigen Einflufs erfordert. Jedenfalls ist das Gesetz durch die Klausel zu beschränken, dafs gleichzeitige gleichmäfsige Innervation symmetrisch gelegener Muskelgruppen keine Teilung der Aufmerksamkeit verlangt. Die Arbeit der einen Hand erhält man also ganz unentgeltlich. Wie wird es aber gehen, wenn man mit beiden Händen arbeitet und zugleich eine Rechenaufgabe löst? Es bedarf hierzu eines gewissen Grades der Aufmerksamkeit, und folglich wird die körperliche Arbeit vermindert werden, wie wird die Verminderung sich aber unter die beiden Hände verteilen? Wird das eine Ergogramm unverändert bleiben, während sich im anderen die gesamte Verminderung zeigt, oder verteilt die Verminderung sich gleichmäfsig

auf beide Ergogramme? Nur die Erfahrung kann diese Frage beantworten; zu welchem Resultate wir aber auch gelangen möchten, so leuchtet es ein, dafs dasselbe sich psychologisch nicht erklären läfst. Denn das Resultat erklären, will nur heifsen: nachweisen, dafs es mit Notwendigkeit aus bekannten Sätzen hervorgeht. Aus dem Gesetze von der Teilung der Aufmerksamkeit läfst sich aber über dieses Verhältnis durchaus nichts folgern, mithin kann das Gesetz auch das empirisch gefundene Resultat nicht erklären. — Die beiden folgenden Versuche werden genügen, um zu erhellen, wie es thatsächlich um die Sache steht.

Pl. XXVIII, A und *B*. d. 31/3. Dr. B. Addition von sechs fünfstelligen Zahlen. *A* das Ergogramm der rechten, *B* das der linken Hand.

	A_s	A_v	$A_s - A_v$	M
Rechte Hand	57,0	46,9	10,1	0,18
Linke »	66,5	53,6	12,9	0,19

Während sowohl die wahrscheinliche als die thatsächlich verrichtete Arbeit, mithin auch die absolute Arbeitsverminderung, ziemlich verschiedene Werte für die beiden Hände zeigt, erhalten wir doch fast identische Werte für M, die relative Arbeitsverminderung. Die psychische Arbeit hat also auf beide Ergogramme gleich stark influiert. Wir vergleichen nun die gefundenen Gröfsen von M mit den Werten, die man für psychische Arbeit derselben Art erhalten würde, wenn nur die eine Hand gearbeitet hätte. Pl. XXI, D zeigt ein unter diesen Verhältnissen von derselben V-P ausgeführtes Ergogramm. Hier ist $M = 0{,}17$ und $0{,}23$ (vgl. S. 208); hiermit stimmen unsere neuen Werte offenbar völlig überein. Wird mit beiden Händen gearbeitet, so bewirkt eine gegebene psychische Arbeit also dieselbe relative Arbeitsverminderung in jedem einzelnen Ergogramm, die man bekommt, wenn mit nur einer Hand gearbeitet wird. Dieses Resultat erweist sich als konstant.

Pl. XXVIII, C und *D*. d. 31/3. A. L. Addition von sechs fünfstelligen Zahlen. *C* das Ergogramm der rechten, *D* das der linken Hand.

	A_s	A_v	$A_s - A_v$	M
Rechte Hand	81,6	60,8	20,8	0,26
Linke »	85,2	61,6	23,6	0,28

Wir erhalten also wieder identische Werte für M. Die Gröfse von M, wenn die linke Hand allein arbeitet, geht aus Pl. XXI, C (vgl. S. 206) hervor. Hier fanden wir $M = 0{,}33$ und 0,38. Die Übereinstimmung ist hier freilich keine so grofse wie bei dem oben erwähnten Versuche, da der Unterschied zwischen 0,28 und 0,33 aber nicht gröfser ist als der zufällige Fehler, 0,05, mit dem, wie wir sehen, die Messungen der Arbeit einer Hand behaftet sind, dürfen wir diese verschiedenen Werte dennoch als gleichgrofs betrachten. Da es sehr schwierig ist, den Grad der Aufmerksamkeit, bei welchem alle diese Messungen ausgeführt wurden, unverändert zu erhalten, läfst sich eine bessere Übereinstimmung eigentlich nicht erwarten.

Wenn mit beiden Händen zugleich gearbeitet wird, bewirkt eine bestimmte psychische Arbeit in beiden Ergogrammen dieselbe relative Arbeitsverminderung, und deren Gröfse ist dieselbe, die man erhält, wenn nur mit der einen Hand gearbeitet wird.

Dieses Resultat kann man, wenn man will, gern als eine Folge des oben nachgewiesenen Verhältnisses betrachten, dafs gleichzeitige, gleichartige Innervation symmetrisch gelegener Muskelgruppen keine Teilung der Aufmerksamkeit erfordert. Die eine Hand führt ganz dasselbe aus, wie die andre, ohne zu verlangen, dafs die Aufmerksamkeit sich ihr speziell zukehrte. Aber weshalb? Psychologisch läfst diese Thatsache sich offenbar nicht erklären. Es kann wohl keinen Zweifel erleiden, dafs das psychologische Gesetz, auf welches wir uns stützten, nur annäherungsweise richtig ist. Dasselbe ist der unvollständige und ungenaue Ausdruck, den die Selbstbeobachtung für die Veränderungen findet, welche während einer sogenannten Konzentration der Aufmerksamkeit im Zentralorgan vorgehen. Da wir die Aufmerksamkeit durchaus nicht beobachten können, sondern nur deren psychische Resultate kennen, ist es leicht verständlich, dafs wir zu keinem genauen psycho-

logischen Ausdruck dessen, was vorgeht, gelangen können. Ein wirkliches Verständnis werden wir erst dann haben, wenn wir im stande sind, die physiologischen Veränderungen anzugeben, deren psychische Wirkungen wir als das Unbekannte: die Aufmerksamkeit, zu bezeichnen pflegen. Im folgenden Abschnitte wird nun auf Basis der hier gewonnenen Erfahrungen ein Versuch gemacht werden, der Natur der Aufmerksamkeit auf den Grund zu kommen.

DIE PSYCHODYNAMISCHEN GRUNDTHATSACHEN.

Hydrodynamische Analogien. Alle im Vorhergehenden hervorgezogenen Thatsachen in betreff des wechselseitigen Einflusses verschiedener psychischer und körperlicher Arbeiten aufeinander befinden sich in völliger Übereinstimmung mit dem, was man an jeder Kraftmaschine beobachten kann, deren freie Energie angewandt wird, um verschiedene Arbeiten zugleich zu verrichten. Um dies nachzuweisen, können wir als Beispiel eine Dampfmaschine, ein galvanisches Element, eine fliefsende Wassermasse oder irgend eine beliebige Einrichtung nehmen, die während jeder Zeiteinheit eine konstante Energiemenge zu freier Verfügung liefert. Da die Sache aber um so leichter verständlich wird, je weniger zusammengesetzt die Maschine ist, und je leichter wir deshalb den Energieumsatz zu verfolgen vermögen, wählen wir die möglichst einfache Maschine: zwei miteinander in Verbindung stehende Wassermassen in verschiedenem Niveau. Der kleine Apparat, den wir nun beschreiben werden, hat vor komplizierteren Apparaten überdies den Vorteil voraus, dafs er sich zu Versuchen bei Vorlesungen gebrauchen läfst, indem er den wechselseitigen Einflufs der verschiedenen Arbeiten unmittelbar veranschaulicht.

Wir nehmen eine grofse Mariotteflasche *F* (Fig. 4) und bringen sie mit Wasser angefüllt in der Höhe von

ein paar Meter über dem Tische an. Wegen ihres Platzes repräsentiert sie jetzt eine gewisse Energiemenge; wir würden die gesamte Energie in Arbeit umgesetzt erhalten können, wenn wir die Flasche aus derselben Höhe, bis zu der sie emporgehoben wurde, hinabfallen liefsen. Das thun wir aber nicht; dagegen setzen wir eine seitliche Öffnung unten an der Flasche mit einem langen, weiten Gummischlauch, S, in Verbindung. Lassen wir das Wasser durch diesen abfliefsen, so verstreicht gewisse Zeit, bis die Flasche geleert ist. Von der gesamten in der Flasche enthaltenen potentiellen Energie wird in jeder Sekunde folglich nur eine gewisse Menge zur Arbeitsleistung disponibel. Die disponible oder freie Energie[1] ist bestimmt durch $mv^2/2$, wo m die pr. Sekunde abfliefsende Menge der Flüssigkeit, v die Geschwindigkeit des Abflusses bezeichnet. Wir können die strömende Flüssigkeit auf ein Wasserrad oder eine Turbine wirken lassen und hierdurch Arbeit geliefert erhalten, wir können aber auch die Flüssigkeit direkt arbeiten lassen, indem wir sie zu einem Springbrunnen gebrauchen. Zu diesem Zwecke

Fig. 4.

[1] Wenn ich im Folgenden die Ausdrücke »disponible« und »freie« Energie ohne Unterschied gebrauche, geschieht dies nicht aus Unachtsamkeit, sondern weil wir auf dem physiologischen Gebiete doch nicht im stande sind, die feinen Unterscheidungen der Physik durchzuführen. Indem ich die beiden Wörter als gleichbedeutend gebrauche, wollte ich zunächst nur pointieren, dafs ich unter freier Energie nicht den scharf definierten Begriff der Physik verstehe, denjenigen Teil der Totalenergie, welcher sich frei in andere Energieformen umsetzen

setzen wir die untere Öffnung des Gummischlauches in Verbindung mit einer dreihalsigen Flasche *W*, in deren drei Hälsen Röhren von verschiedener Weite, *P*, *Q* und *R* angebracht sind. Diese Röhren können durch Hähne verschlossen werden. Zwei der Röhren, *P* und *Q*, sind zu sehr feinen Haarröhrchen ausgezogen, die dritte hat durchweg eine Weite von einigen Millimetern. Ist die Flasche *W* nun ganz mit Wasser gefüllt und sind die Hähne geschlossen, so befindet sich die Flüssigkeit in Ruhe. Öffnen wir aber z. B. die Röhre *P*, so strömt hier die Flüssigkeit aus, und verrichtet eine Arbeit, indem der Strahl sich bis zu einer gewissen Höhe erhebt. Ist die Öffnung der Röhre *P* im Vergleich mit dem Querschnitte des Gummischlauchs *S* nun sehr klein, so leuchtet es ein, dafs während jeder Sekunde durch *P* nicht so viel Wasser fliefsen kann als durch *S*. Es kann daher nur ein geringer Teil der gesamten disponiblen Energie sein, der zur Erzeugung des Springbrunnens bei *P* verbraucht wird.

Durch Versuche können wir uns leicht überzeugen, dafs unsere Betrachtungen richtig sind, dafs wirklich nur ein geringer Teil der disponibeln Energie zum Springbrunnen angewandt wird. Eine gewisse Energiemenge kann nämlich, wie wir wissen, nur ein bestimmtes Quantum Arbeit leisten. Wird also die gesamte disponible Energie zur Erzeugung des Springbrunnens verbraucht, so kann dieselbe Energie nicht auch zu-

läfst. Eine derartige Sonderung hat ihre Bedeutung, solange man weifs, dafs wirklich ein Unterschied besteht. Dies gilt z. B. von unseren Maschinen, wo wir genau anzugeben vermögen, ein wie grofser Teil der Totalenergie frei umgesetzt werden kann. Beim galvanischen Elemente z. B. wird die elektromotorische Kraft als freie Energie bezeichnet, weil sie sich umsetzen läfst, was mit der zugleich entwickelten Wärme dagegen nicht der Fall ist. Wie es sich in dieser Beziehung aber mit dem Gehirn verhält, das wissen wir durchaus nicht. Es ist denkbar, dafs die Erwärmung des Gehirns während der psychischen Thätigkeit ein reiner Energieverlust wäre, es ist aber ebenfalls möglich, dafs die Wärmeentwickelung für die Entstehung der psychischen Phänomene wesentliche Bedeutung hätte und folglich als freie Energie zu betrachten wäre. Da uns hierüber gar nichts bekannt ist, ziehe ich daher den neutralen Begriff der »disponibeln« Energie vor und gebrauche das Wort »freie« Energie nur der Abwechselung wegen.

gleich eine andere Arbeit liefern. Dann mufs der Springbrunnen daher notwendigerweise niedriger werden, wenn wir einen Teil der Energie zu anderer Arbeit gebrauchen. Wird dagegen nur ein sehr geringer Bruchteil der disponibeln Energie zur Erzeugung des Springbrunnens verbraucht, so müssen wir einen Teil der überschüssigen freien Energie zu einer anderen Arbeit verwenden können, ohne dafs diese einen nachweisbaren Einflufs auf den Springbrunnen erhielte. Es erweist sich nun, dafs eben dies der Fall ist. Um uns hiervon zu überzeugen, müssen wir die Höhe des Springbrunnens messen. Dies ist nicht ganz leicht, weil der oberste Teil der Wassermassen sich in einen Fächer von Tropfen auflöst; stellt man aber einen Mafsstab senkrecht dicht an den Strahl, so kann man dennoch mit der Genauigkeit von ca. 1 cm beurteilen, wie hoch die obersten Tropfen steigen. Hierauf öffnen wir die zweite Sprungöffnung Q und erhalten aus dieser noch einen Springbrunnen. Es zeigt sich, dafs dieser auf die Höhe des ersten keinen mefsbaren Einflufs erhält. Hierdurch ist also bewiesen, dafs zu dem ersten Springbrunnen, P, nur ein sehr geringer Teil der totalen disponibeln Energie verbraucht wird, und ferner ziehen wir aus dem Versuche folgende Lehre:

Wenn zur Ausführung einer Arbeit nur ein geringer Teil der gesamten disponibeln Energie einer Maschine verbraucht wird, so hat der gleichzeitige Verbrauch einer anderen geringen Energiemenge keinen mefsbaren Einflufs auf die Gröfse der ersteren Arbeit.

Es erweist sich, dafs dieses Resultat völlig mit dem übereinstimmt, was wir vorher von dem wechselseitigen Einflusse gewisser gleichzeitiger, körperlicher und psychischer Arbeiten aufeinander fanden. Nehmen wir an, dafs zur maximalen Innervation der Muskeln der Hand nur ein sehr geringer Teil der gesamten freien Energie des Gehirns erforderlich sei. Aus dem angeführten Satze folgt dann direkt, dafs der gleichzeitige Verbrauch einer anderen geringen Energiemenge (z. B. zur Innervation der Muskeln der anderen Hand oder zur Leistung einer fortgesetzten Reihe von sinnlichen Wahrneh-

mungen) keinen Einflufs auf die Arbeit der ersteren Hand erhält. Gerade dies zeigten uns aber unsere früheren Versuche. Weder sinnliche Wahrnehmung noch Arbeit mit der rechten Hand hatte Einflufs auf das Ergogramm der linken Hand. Deshalb konnten wir mittels der ergographischen Methode auch kein Mafs für diese Arbeiten bekommen; hieraus darf man sich aber natürlich nicht zu der Annahme verleiten lassen, diese Arbeiten seien ohne Energieverbrauch zu erhalten. Der Vergleich mit den Springbrunnenversuchen zeigt gerade, dafs ein kleiner Energieverbrauch sehr wohl stattfinden kann, ohne auf einen anderen, gleichzeitigen Energieverbrauch mefsbaren Einflufs zu bekommen. Selbstverständlich ist nur die praktische Messung unmöglich, denn in der Wirklichkeit müssen gleichzeitige Energieverbrauche stets einigen Einflufs aufeinander üben. Eine theoretische Betrachtung, die wir an unsere Springbrunnenversuche knüpfen, wird uns leicht hiervon überzeugen.

Es sei die disponible Energie der Flasche $= e$, und es möge die Röhre P, wenn sie allein offen steht, hiervon $^1/_p$ verbrauchen. Öffnen wir nun zugleich die Röhre Q, so verbraucht auch diese ein wenig, sagen wir e/q. Zurück bleibt also $e - e/q = (q - 1)\, e/q$. Dies ist also der übrigbleibende Teil der freien Energie, nachdem die Röhre Q das ihrige verbraucht hat; davon nimmt die Röhre P der Voraussetzung zufolge $^1/_p$, also:

$$\frac{q-1}{q} \cdot \frac{e}{p}$$

Wäre dagegen die Röhre P allein geöffnet, so würde sie die Energiemenge e/p verbrauchen. Es ist nun leicht zu ersehen, dafs:

$$\frac{e}{p} > \frac{q-1}{q} \cdot \frac{e}{p}$$

Folglich hat der Verbrauch bei Q eine Verminderung der Arbeit bei P bewirkt. Ist $^1/_q$ aber sehr klein, q also eine grofse Zahl, so mufs der Bruch $(q - 1)/q$ sehr nahe an 1 liegen, und dann würden die beiden ungleichen Gröfsen praktisch genommen gleichgrofs sein, weil wir nicht im stande sind, den Unterschied zu messen. Wie grofs q sein mufs, damit ein Energieverbrauch keinen nachweisbaren Einflufs auf den anderen erhalte, hängt

natürlich nur davon ab, wie fein wir messen. Dafs man aber in der Praxis, bei weniger feinen Mefsmethoden, leicht an den Punkt gelangt, wo wechselseitiger Einflufs nicht zu spüren ist, zeigten uns sowohl die Springbrunnenversuche als die ergographischen Messungen.

Die Übereinstimmung unserer Springbrunnenversuche mit den ergographischen Messungen, die wir hinsichtlich eines einzelnen Falles nachwiesen, läfst sich mit Bezug auf alle Punkte darthun. Sie läfst sich sogar bis in unwesentliche Einzelheiten verfolgen. Der angeführte Satz, dafs gleichzeitige kleine Energieverbrauche keinen nachweisbaren Einflufs aufeinander haben, ist nicht ganz richtig. Geben wir genau acht, wenn wir die Röhre *Q* öffnen, so werden wir sehen, dafs der Strahl *P* in demselben Augenblicke, da der andere Strahl emporschiefst, ein wenig sinkt. Dies dauert aber nur wenige Sekunden, dann erhebt er sich wieder bis zur vorigen Höhe. Die Erscheinung ist leicht zu erklären. Solange nur die Röhre *P* offen steht, strömt das Wasser mit bestimmter Geschwindigkeit aus *F* nach *W*. Öffnet man nun *Q*, so wird eine gröfsere Wassermasse verbraucht werden, weshalb der Druck in *W* geringer wird. Hieraus folgt nun teils, dafs die Höhe des Strahles *P* abnimmt, und teils, dafs das Wasser sich mit gröfserer Geschwindigkeit aus *F* nach *W* bewegt, weil diese Geschwindigkeit gerade von dem Unterschiede des Druckes an den beiden Punkten abhängig ist. Sobald das Wasser die durch die veränderten Druckverhältnisse bedingte Geschwindigkeit erreicht hat, steigt mithin der Strahl *P* wieder bis zur vorigen Höhe. Etwas ganz Ähnliches konstatierten wir oben von der Arbeit am Ergographen. Wenn die rechte Hand plötzlich anfafst, sieht man gewöhnlich im Momente des Übergangs eine geringe Senkung im Ergogramme der linken Hand, das aber sogleich wieder bis zur normalen Höhe steigt. Dies ist natürlich nur ein unwesentlicher Umstand, dem keine gröfsere Bedeutung beigelegt werden darf; indes zog ich diese Thatsachen hervor, um zu zeigen, wie vollständig die Übereinstimmung ist. Wir schreiten jetzt zur Betrachtung wichtigerer Ähnlichkeitspunkte.

Zuerst wollen wir den Einflufs untersuchen, den ein bedeutender Energieverbrauch auf die Höhe unseres

Springbrunnens erhält. Um die Verhältnisse in gröfserem Umfange variieren zu können, bringen wir an unserem Apparate eine kleine Verbesserung an. Diese besteht darin, dafs die Springbrunnenröhre *P* mit Haarröhrchen von verschiedener Länge und Weite versehen wird. Dies läfst sich leicht machen, wenn *P* nicht selbst in ein Haarröhrchen ausgezogen, sondern überall gleich weit und oben gerade abgeschnitten ist. Ziehen wir nun eine Glasröhre so aus, dafs sie in der Mitte ein Haarröhrchen wird, wie in Fig. 5 gezeigt, und durchschneiden wir dieselbe bei *c*, so haben wir also zwei Stückchen Glasröhre, die jedes für sich mittels eines kleinen Endchens Gummischlauch leicht mit *P* in Verbindung gebracht werden können, und die in Haarröhrchen mit genau derselben äufseren Öffnung enden. Da der Schnitt *c* aber so gelegt ist, dafs ein Stück Haarröhrchen viel länger als das andere ist, so erhalten wir durch diese Röhren Springbrunnen von verschiedener Höhe, denn in dem längeren Haarröhrchen ist die Friktion gröfser als in dem kürzeren, und der Strahl aus ersterem mufs deshalb notwendigerweise geringere Höhe erreichen als der Strahl aus letzterem, indem das Wasser gröfseren Widerstand antrifft. Hiervon überzeugen wir uns leicht durch Versuche, indem wir abwechselnd das kurze und das lange Haarröhrchen an *P* anbringen und in beiden Fällen die Höhe des Springbrunnens über der Sprungöffnung messen. Nehmen wir an, dafs wir für das kurze Haarröhrchen (I) die Steighöhe 93 cm, für das lange (II) 42 cm finden. Wir untersuchen nun, welchen Einflufs ein gröfserer Energieverbrauch auf unsere Springbrunnen hat, indem wir die weite Röhre *R* und darauf den Springbrunnen *P* völlig öffnen. Bildet nun das kurze Haarröhrchen (I) die Öffnung von *P*, so finden wir eine Höhe von 81 cm; die Steighöhe ist also um 12 cm vermindert[1]. Wie zu erwarten stand, hat also der gröfsere Energieverbrauch durch die weite Röhre *R*

c

Fig. 5.

[1] Eigentlich ist es wohl überflüssig, zu bemerken, dafs die hier angeführten Zahlen keine erdichteten sind, sondern aus Messungen hervorgehen; sonst würden sie ja durchaus nichts beweisen.

auf die anderweitig ausgeführte Arbeit influiert. Wir suchen nun ein Mafs für diese Arbeitsverminderung.

Die Arbeit, die eine strömende Flüssigkeit verrichtet, indem sie fast senkrecht durch eine feine Öffnung emporspringt, besteht darin, dafs ein gewisses Gewicht Wasser bis zu einer bestimmten Höhe gehoben wird. Die Arbeit wird also gemessen durch das Produkt des Gewichtes des Wassers und der Höhe, bis zu welcher dasselbe gehoben wird. Solange man dieselbe Sprungöffnung, mithin dieselbe Wassermenge hat, wird also die verrichtete Arbeit der Höhe proportional sein. In dem oben angeführten Beispiele wird folglich der Unterschied der Höhe, 12 cm, das Mafs der Arbeitsverminderung sein, die dadurch verursacht wird, dafs wir einen gewissen Teil der disponiblen Energie zu anderem Zwecke anwenden. Wie stellt sich aber das Verhältnis, wenn unser Springbrunnen gleich anfänglich eine andere Höhe gehabt hätte? Um dies zu untersuchen, bringen wir das Haarröhrchen II (das lange) an *P* an und öffnen *R*, ganz wie vorhin. Wir erhalten nun die Steighöhe 36 cm; wäre *R* nicht offen gewesen, so hätten wir, wie oben angegeben, die Höhe 42 cm gefunden. Der Unterschied der Höhe ist also 6 cm, nur die Hälfte der Gröfse, die wir für den anderen Springbrunnen fanden. Es ist aber leicht zu ersehen, dafs der relative Höhenunterschied konstant ist. Um den Überblick zu erleichtern, können wir die Zahlen zu einem Schema ordnen. Nennen wir die anfängliche Steighöhe A_s, die Höhe, die wir finden, wenn wir zugleich *R* öffnen, A_v, so haben wir:

	A_s	A_v	$A_s - A_v$	$(A_s - A_v) / A_s$
Haarröhrchen I	93	81	12	0,13
» II	42	36	6	0,14

Hieraus geht hervor, dafs der relative Unterschied der Höhe, d. h. die Höhenverminderung dividiert mit der anfänglichen Höhe, eine konstante Gröfse ist. Oder mit anderen Worten: die Verminderung der Höhe beträgt einen konstanten Bruchteil der anfänglichen Höhe. Dafs wir bei den beiden Versuchen nicht genau denselben Wert für den Bruch fanden, rührt natürlich davon her, dafs wir die Höhe der Springbrunnen nicht mit völliger Genauigkeit messen konnten. Folglich werden auch die daraus berechneten Gröfsen mit kleinen Fehlern

behaftet. Die Gröfse der Brüche selbst ist natürlich davon abhängig, ein wie grofser Energieverbrauch zugleich in anderen Richtungen stattfindet. Geben wir der Röhre *R* eine andere Weite, so werden wir auch für den relativen Höhenunterschied einen anderen Wert finden. Hiervon kann man sich leicht durch Umdrehen des Hahns an *R* überzeugen. Dadurch wird die Röhre verengert und der Energieverbrauch mithin verringert; zugleich nimmt die Höhe des Springbrunnens bei *P* zu. Nimmt aber A_v zu, so mufs die Gröfse $(A_s - A_v)/A_s$ abnehmen; der relative Höhenunterschied ist also davon abhängig, wie grofs der gleichzeitige andere Energieverbrauch ist. Als Resultat dieser Versuche können wir also folgendes feststellen:

Wenn zur Verrichtung einer Arbeit nur ein geringer Teil der gesamten disponibeln Energie einer Maschine verbraucht wird, so wird ein gleichzeitiger Verbrauch einer gröfseren Energiemenge zur Folge haben, dafs die erste Arbeit um einen konstanten Bruchteil vermindert wird; die Gröfse des Bruchteils ist davon abhängig, wie grofs der gleichzeitige Energieverbrauch ist.

Diese Versuche bieten augenfällige Übereinstimmung mit unseren ergographischen Messungen der Gröfse der psychischen Arbeiten dar. Von einer gegebenen psychischen Arbeit fanden wir, dafs sie eine Verminderung der gleichzeitigen körperlichen Arbeit bewirkt, und dafs diese Verminderung einen konstanten Bruchteil der Gröfse der körperlichen Arbeit beträgt, ohne Rücksicht auf das Stadium der Ermüdung, in welchem die arbeitenden Muskeln sich befinden. Dies stimmt völlig mit dem überein, was die Springbrunnenversuche zeigen. Die beiden verschiedenen Haarröhrchen entsprechen dem Muskel in zwei verschiedenen Stadien der Ermüdung. Das lange Haarröhrchen gibt gröfsere Friktion als das kurze, mithin geringere Steighöhe, ganz wie ein ermüdeter Muskel der Arbeit mehr widerstrebt als ein frischer Muskel, und deshalb Partialarbeiten von geringerer Höhe leistet als letzterer. Bei einem bestimmten Energieverbrauche wird die relative Arbeitsverminderung dennoch konstant — dies gilt vom Muskel,

wenn wir zu einer psychischen Arbeit Energie gebrauchen, ebensowohl als vom Springbrunnen, wenn wir zu einem anderen Springbrunnen Energie anwenden.

Theoretisch läfst dieses Resultat sich nun auch leicht begründen. Ist der Energieverbrauch durch die Röhre P, wenn diese allein offen steht, $A_s = e/p$, so wird der Verbrauch sinken bis auf:

$$A_v = \frac{q-1}{q} \cdot \frac{e}{p}$$

wenn gleichzeitig eine andere Röhre geöffnet und durch diese e/q verbraucht wird. Die Arbeitsverminderung, welche das Öffnen der anderen Röhre bei P bewirkt, ist folglich:

$$A_s - A_v = \frac{e}{p} - \frac{q-1}{q} \cdot \frac{e}{p} = \frac{e}{p}\left(1 - \frac{q-1}{q}\right) = \frac{1}{q} \cdot \frac{e}{p}$$

. . . . (Gleich. 56).

Dividieren wir diese Gröfse mit der anfänglichen Arbeit e/p, so bekommen wir die relative Arbeitsverminderung M:

$$\frac{A_s - A_v}{A_s} = M = \frac{1}{q} \cdot \frac{e}{p} : \frac{e}{p} = \frac{1}{q} \quad . . . . \text{(Gleich. 57).}$$

Hieraus geht hervor, dafs:

die relative Arbeitsverminderung M gerade der Bruchteil der gesamten disponibeln Energie ist, der zur anderen Arbeit angewandt wird.

Es liegt also nichts Sonderbares darin, wenn wir überall, sowohl bei den Springbrunnenversuchen als bei den ergographischen Messungen, fanden, dafs M mit der Gröfse der gleichzeitig verrichteten Arbeit variiert. M ist, wie wir sehen, kein willkürliches Mafs, sondern gibt gerade denjenigen Bruchteil der gesamten disponibeln Energie an, der von der zu messenden Arbeit verbraucht wird. Dafs dem wirklich so ist, können wir leicht durch einen Versuch mit dem Springbrunnen erfahren, wo wir im stande sind, die Gröfse der disponibeln Energie wie auch diejenige Menge derselben, welche durch eine der Röhren entladen wird, zu berechnen.

Gesetzt, wir finden durch Messungen, dafs die Leitung zwischen unseren beiden Flaschen durchweg eine

Weite von genau 9 mm hat. Nehmen wir nun ein kleines Stückchen einer Glasröhre, die eine Weite von gerade 4,5 mm hat, so wird das Querschnittsareal derselben also $^1/_4$ von dem der Leitung sein. Setzen wir diese Glasröhre in die Flasche bei R, so leuchtet ein, dafs eben $^1/_4$ der ganzen Wassermasse, die durch die Leitung fliefst, durch R abgeführt werden kann. Läfst man R ganz geöffnet bleiben, so wird also gerade $^1/_4$ der gesamten disponibeln Energie verbraucht werden, um den Springbrunnen durch diese Röhre zu bilden. Bei P und Q bringen wir zwei Haarröhrchen von ganz verschiedener Länge und Weite an. Wir messen nun successiv die Steighöhe A_s durch P bez. Q, während die beiden anderen Röhren verschlossen sind. Darauf öffnen wir R und messen die Steighöhe A_v für P bei verschlossenem Q und für Q bei verschlossenem P. In untenstehendem Schema sind die Ergebnisse dieser vier Messungen nebst den hieraus berechneten Gröfsen, $A_s - A_v$ und M, angegeben.

	A_s	A_v	$A_s - A_v$	M
Springbrunnen P	91	68	23	0,25
» Q	76	58	18	0,24

Wir sehen wieder, dafs die beiden Werte von M gleichgrofs und aufserdem gleich $^1/_4$ sind, was sie der Theorie zufolge auch sein sollten, da wir gerade $^1/_4$ der disponibeln Energie durch R verbrauchten. Die Erfahrung bestätigt unsere theoretischen Erwartungen also vollständig.

An diesen Versuch müssen wir indes einige Erwägungen knüpfen. Aus Gleich. 56 und 57 geht nämlich hervor, dafs $M = {}^1/_q$, wenn wir den Energieverbrauch der Röhre P messen, während diese allein oder auch zugleich die Röhre R geöffnet ist, und darauf M aus der Gleichung:

$$M = \frac{A_s - A_v}{A_s} = \left(\frac{e}{p} - \frac{q-1}{q} \cdot \frac{e}{p}\right) : \frac{e}{p} \quad \ldots . \text{ (Gleich. 58)}$$

berechnen. Dies thaten wir aber ja, streng genommen, gar nicht. Wir mafsen nicht die beiden Energieverbrauche, sondern die aus denselben resultierenden Steighöhen, die allerdings, wie oben erwähnt, den bezüglichen Energieverbrauchen proportional sind. Es ist indes leicht zu ersehen, dafs man zu demselben Resultate, $M = {}^1/_q$,

gelangen mufs, wenn man mit diesen Gröfsen statt mit den Energiemengen rechnet. Hierdurch hat man nämlich in der That nur die drei Gröfsen der Gleich. 58 mit einem konstanten Faktor multipliziert, der auf den Wert des M keinen Einflufs erhalten kann. Es ist also einerlei, ob man zur Berechnung der relativen Arbeitsverminderung M die Energiemenge selbst oder damit proportionale Gröfsen benutzt. Dagegen leuchtet es ein, dafs man nicht statt der wirklichen Energiemengen solche Gröfsen setzen darf, die willkürliche Funktionen derselben sind. Dann würde Gleich. 58 die Form annehmen:

$$M = \frac{A_s - A_v}{A_s} = \left[\varphi\left(\frac{e}{p}\right) - \varphi\left(\frac{q-1}{q} \cdot \frac{e}{p}\right)\right] : \varphi\left(\frac{e}{p}\right) \ldots \text{(Gl. 59).}$$

Man sieht sogleich, dafs der aus Gleich. 59 berechnete Wert von M durchaus von der Beschaffenheit der Funktion φ abhängig sein würde. Ist letztere algebraisch, z. B. eine Potenz der bezüglichen Gröfsen, so kann M konstant, von e/p unabhängig, dagegen aber nicht gleich $1/q$ sein. Ist die Funktion keine algebraische, sondern z. B. logarithmisch, so wird M von e/p abhängig werden, und also keine konstante Gröfse sein. Es ist daher durchaus notwendig, darüber im reinen zu sein, in welchem Verhältnisse die gemessenen Gröfsen zu den thatsächlich stattfindenden Energieverbrauchen stehen, da man sonst nicht im stande ist, die Bedeutung des aus der Berechnung resultierenden M zu entscheiden.

Diese Betrachtungen haben, wie leicht zu verstehen, besonders die ergographischen Messungen der Gröfse der psychischen Arbeiten vor Augen. Wir fanden an jedem Punkte völlige Übereinstimmung der ergographischen Messungen mit den Springbrunnenversuchen, so dafs es keinen Zweifel erleiden kann, dafs eine psychische Arbeit auf die gleichzeitige Muskelinnervation influiert, und zwar ganz denselben Gesetzen gemäfs, die für jede Maschine gültig sind, welche für zwei verschiedene Arbeiten zugleich Energie liefert. Die relative Arbeitsverminderung, welche eine gegebene psychische Arbeit bewirkt, würde folglich gerade denjenigen Bruchteil der freien Energie des Gehirns angeben, der zur bestimmten psychischen Arbeit ver-

braucht wird, wenn die geleistete Muskelarbeit der zentralen Innervation proportional wäre. Wie wir zur Berechnung des *M* die Steighöhen statt der wirklichen Energieverbrauche anwenden können, so müssen wir auch statt der Energieentladungen in den motorischen Zentren die Gröfse der Muskelarbeit benutzen können — wenn nur die Bedingung erfüllt wird, dafs die Gröfse der Muskelarbeit stets den zentralen Energieentladungen, den motorischen Innervationen proportional ist. Hierüber wissen wir leider dessen aber nichts.

Die Frage nach der Abhängigkeit der Muskelarbeit von der Stärke der Innervation ist schon der Gegenstand physiologischer Untersuchungen gewesen. Fick fand, dafs die Kontraktionshöhe des Muskels innerhalb ziemlich weiter Grenzen proportional zur Stärke der Stromstöfse, durch welche der motorische Nerv gereizt wurde, anwuchs. Da Preyer indes gegen die Anwendung der Muskeln, welche Fick zu seinen Untersuchungen gewählt hatte, Einwürfe erhob, fand Fick in einer anderen Versuchsreihe, dafs die Gröfse der Muskelkontraktion bei zunehmender Intensität des Stromes anfangs geschwind, später langsam zunimmt[1]. Die Sache ist also noch nicht entschieden worden, und spätere Untersuchungen über die Frage scheinen nicht vorzuliegen. Und selbst wenn derartige physiologische Versuche uns ganz unzweifelhafte Resultate gegeben hätten, wäre damit nicht einmal gesagt, dafs wir uns auf dieselben stützen dürften. Jedenfalls haben wir gar keine Garantie, dafs die künstliche Reizung eines motorischen Nervs dieselbe Wirkung hat wie die normale Innervation aus dem Zentralorgan. Es wäre z. B. sehr wohl denkbar, dafs die Muskelarbeit in annähernd logarithmischem Verhältnisse zur künstlichen Reizung, der normalen Innervation dagegen proportional zunehme. Denn es würde sogar ziemlich wahrscheinlich sein, dafs die Reizung des motorischen Nervs mit der Stärke des zur Reizung angewandten elektrischen Stromes nur logarithmisch anwüchse. Es ist uns also durchaus verwehrt, auf diesem Wege zur Lösung der uns interessierenden Frage zu gelangen.

---

[1] Untersuchungen über die elektrische Nervenreizung. 1869.

Da es sich darum handelt, zu erfahren, wie die Muskelarbeit mit der zentralen Innervation zunimmt, scheint folgendes Verfahren ans Ziel führen zu können. Man führt am Ergographen einen kleinen Zug von willkürlicher Gröfse, darauf einen ein wenig gröfseren Zug aus. Nach diesem sucht man einen dritten auszuführen, der No. 2 ebensoviel an Gröfse übertrifft, wie der zweite den ersten. Auf diese Weise fährt man fort, indem man der Innervation bei jedem Zuge denselben Zuwachs zu geben strebt. Die hieraus resultierenden successiven Arbeitsgröfsen werden also zeigen, wie die Muskelarbeit anwächst, wenn die Innervation um eine konstante Differenz zunimmt. Auf diese Weise liefs ich einige Versuche von einer Reihe von Versuchspersonen ausführen, die alle gute Beobachter und in psychologischen Experimenten geübt waren. Mit Bezug auf die meisten waren die gewonnenen Resultate erstaunlich regelmäfsig — leider sind sie zur Beantwortung der Frage aber gar nicht zu gebrauchen. Unter allen Versuchspersonen herrschte nämlich die schönste Einigkeit darüber, dafs für die Gröfse der successiven Züge rein periphere Empfindungen, Druck- und Muskelempfindungen, bestimmend waren. Auf andere Weise war eine Anpassung der Innervation gar nicht möglich. Die Versuche lehren uns also durchaus nichts über das Verhältnis der Muskelarbeit zur Innervation, dagegen zeigen sie, wie die Muskelarbeit zunehmen mufs, wenn die aus derselben resultierenden Druck- und Muskelempfindungen mit annähernd konstanter Differenz zunehmen sollen. Dies kann natürlich ebenfalls von Interesse sein, hat aber mit dem vorliegenden Probleme nichts zu thun, weshalb ich mich hier nicht näher darauf einlasse.

Da eine Entscheidung also nicht direkt zu erzielen war, verdiente es, untersucht zu werden, ob denn keine der im Vorhergehenden besprochenen Untersuchungen einen Beitrag zur Beantwortung leisten könnte. Es braucht wohl kaum bemerkt zu werden, dafs das oben nachgewiesene Gesetz für die Abhängigkeit der Arbeit von der Anzahl der Partialarbeiten zur Lösung des vorliegenden Problems durchaus nicht zu gebrauchen ist. Bei konstanter Innervation werden die successiven

Partialarbeiten wegen steigender Ermüdung der Muskeln an Gröſse abnehmen, hieraus läſst sich aber offenbar gar nichts darüber ableiten, wie die Gröſse der Arbeit eines Muskels mit der Innervation variiert. Dagegen scheint eben der Umstand, daſs die relative Arbeitsverminderung für eine gegebene psychische Arbeit konstant ist, in bestimmter Richtung zu deuten. Denn wir sahen oben, daſs man die Konstanz dieser Gröſse nur dann erwarten darf, wenn die gemessenen Gröſsen, aus denen sie berechnet wird, algebraische Funktionen derjenigen Energieverbrauche sind, welche eigentlich die Grundlage der Berechnung bilden sollten. Nun maſsen wir die Muskelarbeit, während wir die zentralen, motorischen Innervationen hätten messen sollen; nichtsdestoweniger erwies die relative Arbeitsverminderung sich als konstant. Dies würde unmöglich sein, wenn die Muskelarbeit in logarithmischem Verhältnisse zur Innervation zunähme; es wird hier ein einfaches algebraisches Verhältnis der beiden Gröſsen vorausgesetzt. Eine derartige Relation würde denn auch stattfinden, wenn die Muskelarbeit irgend einer Potenz der Intensität der Innervation proportional wäre; für die Annahme eines so sonderbaren Verhältnisses kann ich freilich aber keinen triftigen Grund finden.

Einstweilen ist es also die natürlichste Annahme, daſs die Muskelarbeit der Gröſse der Innervation proportional zunimmt, und unter dieser Voraussetzung wird die durch eine bestimmte psychische Arbeit bewirkte relative Arbeitsverminderung gerade denjenigen Bruchteil der freien Energie des Gehirns angeben, der zur betreffenden psychischen Arbeit verbraucht wird.

Es erübrigt noch, zu untersuchen, welchen Einfluſs ein gröſserer Energieverbrauch auf jeden der beiden Springbrunnen haben wird, wenn beide zugleich springen. Durch einen Versuch wie den zuletzt (S. 247) erwähnten können wir dies leicht finden, indem wir die Steighöhen messen, während sowohl P als Q geöffnet, R aber geschlossen ist. Da die beiden Röhren sehr fein sind, also nur wenig Energie verbraucht wird, können wir keinen wechselseitigen Einfluſs nachweisen, oder mit anderen

Worten: wir finden genau dieselben Höhen, wenn beide Springbrunnen zugleich springen, die wir finden, wenn jeder derselben allein springt. Öffnen wir nun die Röhre *R* und messen wir aufs neue die Höhen, so finden wir wieder dieselben Zahlen, die wir erhielten, als wir jede der Höhen für sich maſsen. Die im Schema (S. 247) angeführten Zahlen gelten also in beiden Fällen, sowohl wenn beide Springbrunnen zugleich springen, als wenn nur einer derselben springt. Folglich wird auch das für jeden der Springbrunnen berechnete *M* zu identischen Werten führen, trotzdem die gemessenen Höhen sehr verschieden waren. Daſs dies völlig mit der Theorie übereinstimmt, ist so leicht zu ersehen, daſs wir hierbei nicht zu verweilen brauchen. Ob wir 2, 3 oder irgend eine gröſsere Anzahl Springbrunnen zugleich springen lassen, ist ganz gleichgültig. Findet in anderer Richtung ein gröſserer Energieverbrauch statt, so muſs die Steighöhe jedes Springbrunnens um einen konstanten Bruch vermindert werden, welcher gerade den zur anderen Arbeit verbrauchten Teil der disponibeln Energie beträgt. Wir haben also:

W e n n z w e i o d e r m e h r A r b e i t e n, d i e n u r e i n e n g e r i n g e n T e i l d e r f r e i e n E n e r g i e e i n e r M a s c h i n e b e a n s p r u c h e n, z u g l e i c h v e r r i c h t e t w e r d e n, s o h a t e i n g r ö ſ s e r e r E n e r g i e v e r b r a u c h z u r F o l g e, d a ſ s j e d e d e r e i n z e l n e n A r b e i t e n u m e i n e n k o n s t a n t e n B r u c h t e i l v e r m i n d e r t w i r d, w e l c h e r g e r a d e d e n j e n i g e n T e i l d e r f r e i e n E n e r g i e d e r M a s c h i n e a n g i b t, d e n d e r g r ö ſ s e r e V e r b r a u c h e r f o r d e r t.

Wie man sieht, findet wieder völlige Übereinstimmung der Springbrunnenversuche mit den ergographischen Bestimmungen statt. Durch letztere gelangten wir nämlich (S. 236) zu folgendem Resultat: wird mit beiden Händen zugleich gearbeitet, so bewirkt eine bestimmte psychische Arbeit dieselbe relative Arbeitsverminderung in beiden Ergogrammen, und deren Gröſse ist dieselbe, die man erhält, wenn nur mit einer Hand gearbeitet wird. Letzterer Umstand, daſs *M* denselben Wert erhält, man möge es nun aus zwei gleichzeitig ausgeführten Ergogrammen oder nur aus einem einzelnen berechnen, ist offenbar die notwendige Folge

davon, dafs M nur von der Gröfse der psychischen Arbeit abhängig ist; ob wir diese einmal oder mehrmals an verschiedenen Stellen messen, kann auf M keinen Einflufs erhalten. Alle eigentümlichen Verhältnisse der Arbeit mit zwei Händen, welche das psychologische Aufmerksamkeitsgesetz durchaus nicht zu erklären vermochte, gehen also aus der hier durchgeführten dynamischen Betrachtung als einfache Konsequenzen hervor. Es wird nun zu untersuchen sein, erstens, inwiefern diese Auffassung sich mit dem, was wir sonst über die zentralen Prozesse wissen, überhaupt in Übereinstimmung bringen läfst, und zweitens, wie man von diesem Gesichtspunkte aus die Aufmerksamkeit zu erklären vermag.

Bevor wir hierzu schreiten, wird es doch angesichts der Wichtigkeit der Sache in der Ordnung sein, dafs für die Richtigkeit der oben aufgestellten Sätze von der wechselseitigen Einwirkung gleichzeitiger Arbeiten aufeinander ein fernerer Beweis geführt wird. Man könnte sich sonst leicht der Annahme zuneigen, die Übereinstimmung der Springbrunnenversuche mit den ergographischen Bestimmungen sei eine ganz zufällige, indem die beiden Reihen von Versuchen nur eine oberflächliche Ähnlichkeit darböten, durch die sich nichts begründen lasse. Der Springbrunnenapparat wäre vielleicht sogar die einzige Anordnung, für welche die aufgestellten Sätze gölten. Zu bestreiten ist es jedenfalls nicht, dafs die Gemeingültigkeit der Sätze hierdurch keineswegs bewiesen ist. Viele möchten sogar wohl meinen, ein Stück Spielzeug wie der Springbrunnenapparat, der nicht einmal genaue Messungen gestatte, sei in einer ernstlichen wissenschaftlichen Diskussion nicht als Argument zu gebrauchen. Um diese verschiedenen Einwürfe zu widerlegen, werde ich folgenden Satz beweisen:

Die früher gefundenen Gesetze von der wechselseitigen Einwirkung verschiedener, von einer Maschine verrichteter gleichzeitiger Arbeiten sind auch für das galvanische Element gültig, indem es sich erweist, dafs sie sich aus dem Ohmschen Gesetze direkt ableiten lassen.

Möglicherweise ist hierin gar nichts Neues enthalten: ich halte es sogar für wahrscheinlich, dafs die Elektrotechniker mit der Sache vertraut sind, da man aber nicht einmal in den gröfseren Handbüchern der Physik etwas hierüber finden kann, wird eine kurze Beweisführung hier am Platze sein.

In der Fig. 6 seien B und D die Pole einer konstanten galvanischen Batterie, deren elektromotorische Kraft e ist. Mit dem Pole B verbinden wir einen Metalldraht, BC, und die Elemente der Batterie werden so geordnet, dafs der innere Widerstand dem äufseren gleich wird; der gesamte Widerstand sei m. Bildet dieser Draht allein die äufsere Leitung, indem der Punkt C mit D in Verbindung gesetzt wird, so wird die Stromstärke A_m durch den Draht das Maximum sein, weil der innere und der äufsere Widerstand sich gleich sind; A_m ist also die maximale Stromenergie, welche die Batterie unter diesen Umständen zu leisten vermag. Dem Ohmschen Gesetze zufolge ist nun $A_m = e/m$. Wir schalten nun zwischen den Punkten C und D einen langen dünnen Draht mit dem Widerstande v ein; diese Leitung durchläuft dann ein Strom A_s, der ebenfalls dem Ohmschen Gesetze gemäfs durch $A_s = e/(m+v)$ bestimmt ist. Wir untersuchen darauf, welchen Einflufs es auf den Strom durch den Widerstand v erhält, wenn wir einen Teil des Stromes durch den kurzen starken Draht CD ablenken, dessen Widerstand w ist. Nach den bekannten Sätzen von der Stromverzweigung, die sich übrigens sämtlich aus dem Ohmschen Gesetze ableiten lassen, wird die Stromstärke A_v in dem Zweige, der den Widerstand v leistet, folgende sein:

Fig. 6.

$$A_v = \frac{w \cdot e}{m\,(v+w) + v \cdot w}$$

Bevor der Widerstand w eingeschaltet wurde, hatten wir in der Leitung v die Stromstärke A_s, jetzt ist die Stromstärke A_v, es hat folglich eine Stromverminderung stattgefunden von der Gröfse:

$$A_s - A_v = \left(\frac{1}{m+v} - \frac{w}{m\,(v+w) + v \cdot w}\right) e$$

Die relative Stromverminderung erhält man durch Division von $A_s - A_r$ mit A_s, folglich hat man:

$$M = \frac{A_s - A_r}{A_s} = 1 - \frac{w(m+v)}{m(v+w)+v \cdot w} = \frac{m \cdot v}{m(v+w)+v \cdot w}$$

Dieser Bruch sollte also gerade denjenigen Bruchteil der maximalen Stromenergie angeben, der die Leitung w durchläuft. Die maximale Stromenergie fanden wir oben durch $A_m = e/m$ ausgedrückt; die Leitung w durchläuft ein Strom, dessen Stärke A_w gegeben ist durch:

$$A_w = \frac{v \cdot e}{m(v+w)+v \cdot w}, \text{ folglich ist}$$

$$\frac{A_w}{A_m} = \frac{m \cdot v}{m(v+w)+v \cdot w}$$

Man sieht, dafs dieser Bruch mit dem Ausdruck für M identisch ist. Hierdurch ist also bewiesen, dafs in der einen Leitung eine Stromverminderung stattfindet, wenn gleichzeitig ein Strom die andere Leitung durchläuft, und ferner sieht man, dafs die relative Stromverminderung den durch die Nebenleitung abgelenkten Bruchteil der gesamten Stromenergie des Elementes angibt. Da der Satz somit für eine Zweiteilung des Stromes bewiesen ist, wird er sich auch leicht auf den Fall erweitern lassen, dafs der Strom von Anfang an verzweigt war. Alle diese Ströme werden ohne Rücksicht auf ihre Anzahl und Stärke um denselben Bruchteil vermindert, wenn eine neue Nebenleitung eingeschaltet wird. Die Gemeingültigkeit unserer Gesetze dürfte mithin wohl als dargethan zu betrachten sein.

Dynamische Erklärung der Aufmerksamkeit. Rein empirisch fanden wir, dafs eine psychische Arbeit, die mit einer oder mit mehreren körperlichen Arbeiten zugleich ausgeführt wird, die Gröfse derselben auf gesetzmäfsige Weise beeinflufst. Hierauf wiesen wir nach, dafs eben dieselben Gesetze für die wechselseitige Einwirkung verschiedener, von irgend einer Maschine verrichteter Arbeiten gültig sind. Da es nicht anzunehmen ist, dafs eine solche Übereinstimmung nur ein Zufall sei, schlossen wir ohne weiteren Vorbehalt aus gemeinschaftlicher Wirkung auf gemeinschaftliche Ursache. Es wurde deshalb ohne nähere Begründung voraus-

gesetzt, dafs gleichzeitige Energieverbrauche im Gehirn auf irgend eine, übrigens unbekannte Weise aufeinander einwirkten, ganz ebenso wie gleichzeitige Energieverbrauche jeder beliebigen Maschine. Ferner wurde angenommen, dafs die gleichartigen Verhältnisse uns berechtigten, die gleichen Schlüsse zu ziehen. Da wir in betreff einer Maschine aus den gemessenen Veränderungen der Gröfse der einen Arbeit die Gröfse des anderen gleichzeitigen Energieverbrauchs zu berechnen im stande sind, nahmen wir an, dafs dasselbe auch von gleichzeitigen Hirnarbeiten gelten müsse. Es wurde daher als gegeben betrachtet, dafs man — unter Voraussetzung der Proportionalität zwischen der Muskelarbeit und der motorischen Innervation — aus den gemessenen Veränderungen in den Ergogrammen den relativen Energieverbrauch bei der gleichzeitigen psychischen Arbeit berechnen könne. Unsere Berechtigung, diese Annahmen zu machen, beruht nun offenbar auf der unbewiesenen Voraussetzung, dafs das Gehirn — in physischer Beziehung — eine Kraftmaschine ist, und deshalb denselben Gesetzen unterworfen ist, die für derartige Maschinen Gültigkeit haben. Nun ist der Umstand, dafs das Gehirn thatsächlich diesen Gesetzen gehorcht, unleugbar ein gewichtiges Argument, und ich gestehe, dafs es mir unmöglich ist, einzusehen, wie man eigentlich eine solche Übereinstimmung erklären soll, wenn man keine gegenseitige Einwirkung gleichzeitiger Energieentladungen im Gehirn annehmen will. Dennoch müfste eine solche Auffassung verworfen werden, wenn es sich erweisen sollte, dafs sie dem Wenigen, was wir über die zentralen Prozesse wissen, völlig widerstritte. Es ist daher notwendig, vorerst zu untersuchen, inwiefern unsere Kenntnis dieser Verhältnisse eine derartige Annahme gestattet.

Es darf als festgestellte Thatsache betrachtet werden, dafs die Zellen des Gehirns, die Neuronen, Energiebehälter sind, in denen die Energie unter der Form äufserst komplizierter und deshalb leicht zerteilbarer Moleküle aufgespeichert ist. Durch Zerteilung dieser Stoffe entstehen der Erfahrung gemäfs Wärme und Elektrizität, möglicherweise auch noch andere, unbekannte Energieformen. In jedem einzelnen Neuron

wird während der Zeiteinheit wahrscheinlich nur eine verhältnismäſsig geringe Menge Energie umgesetzt werden können, durch gleichzeitige Arbeit einer groſsen Anzahl von Neuronen muſs es aber doch möglich sein, in jedem einzelnen Augenblicke bedeutende Energiemengen zu entwickeln. Die ganze Summe von Energie, welche das Gehirn in jedem einzelnen Augenblicke zu leisten vermag, nannten wir im Vorhergehenden die disponible oder freie Energie des Gehirns. Diese muſs notwendigerweise nur ein sehr geringer Teil der in chemischer Form im Gehirn aufgespeicherten Energiemenge sein. Hierauf deutet wenigstens der Umstand hin, daſs das Gehirn nur durch sehr angestrengte, lange andauernde Arbeit ermüdet. Wäre es möglich, während jeder Zeiteinheit einen gröſseren Bruchteil der gesamten Energie des Gehirns zu verbrauchen, so scheint hieraus folgen zu müssen, daſs man durch sehr groſse geistige Anstrengungen das Gehirn während verhältnismäſsig kurzer Zeit völlig erschöpfen könnte. Es müſste dann ein ähnlicher Zustand totaler Ermüdung entstehen, wie wir ihn von den Muskeln kennen. Unsere ergographischen Versuche zeigten — was die tägliche Erfahrung übrigens völlig bestätigt — daſs es möglich ist, während kurzer Zeit einen Muskel so müde zu arbeiten, daſs er überhaupt unfähig wird, sich trotz aller willkürlichen Anstrengung zusammenzuziehen. Dies geschieht, wie wir wissen, obschon der Stoffwechsel bei der Muskelarbeit bedeutend zunimmt. Einen ähnlichen Zustand der Erschöpfung der Energie des Zentralorgans — der wahrscheinlich den Tod des Individuums zur Folge haben würde — kennen wir nicht. Dies deutet offenbar darauf hin, daſs die disponible Energie, die in jedem Augenblick verbraucht werden kann, nur ein geringer Teil der gesamten aufgespeicherten Energiemenge ist. Wie diese Transformation der Energie, der Umsatz chemischer Energie in andere Energieformen, sich unter gegebenen Verhältnissen unter die verschiedenen Neuronen verteilt, wird nun im Folgenden die Aufgabe unserer Untersuchung werden.

Die Energie des Gehirns ist also über eine sehr groſse Anzahl von kleinen Energiebehältern, von Neuronen verteilt. Stehen diese nun in solcher Verbindung

miteinander, dafs man annehmen kann, eine Veränderung an einem Punkte übe auch auf den Zustand anderer, fernerer Stellen Einflufs? Dies kann durchaus keinen Zweifel erleiden. Der Bau des Neurons ist gerade ein solcher, dafs er im höchsten Grade die Verbindung der einzelnen Zelle mit zahllosen anderen, sowohl näher als ferner liegenden erleichtert. Die einzelne Zelle entsendet teils mehrere äufserst fein verästelte Ausläufer, Dendriten, teils eine oder zwei unverästelte Nervenfasern, Achsencylindervorsprünge, die oft, zum Teil von anderen Nervenelementen isoliert, lange Strecken durchlaufen, bis sie sich schliefslich in einen verzweigten Büschel auflösen. Alle diese Verästelungen, sowohl die Dendriten als die eigentlichen Nervenfasern, bilden ein dichtes Geschlinge mit unzähligen gegenseitigen Berührungen. Der Unterschied zwischen den beiden Arten von Nervenelementen, den Achsencylindervorsprüngen und den Dendriten, besteht darin, dafs diese die Bewegung cellipetal, jene dagegen cellifugal leiten. Eine Bewegung bestimmter Art, die in einem einzelnen Neuron entsteht, wird sich also durch die Nervenfaser aus diesem Neuron und dann auf diejenigen Neuronen fortpflanzen, mit deren Dendriten die Nervenfaser kommuniziert. Aus den empfangenden Dendriten geht die Bewegung weiter durch die betreffenden Zellen und deren Nervenfasern u. s. w. Die Kommunikationen sind so vielfach, dafs es fast unbegreiflich ist, weshalb nicht das ganze Zentralorgan durch jede Zustandsänderung des einzelnen Neurons in Bewegung gesetzt wird[1]. Gegenwärtig läfst sich wohl nicht viel mehr darüber sagen, als dafs jedes Neuron nicht für Zustandsänderungen jeder Art gleich empfänglich zu sein braucht. Die Bewegung pflanzt sich daher vorzüglich bis zu denjenigen Neuronen fort, welche der bestimmten Art der Bewegung angepafst und deshalb gerade für dieselbe empfänglich sind. Im Folgenden kommen wir übrigens auf diese Frage zurück.

Das Zentralorgan ist also so gebaut, dafs eine an einem einzelnen Punkte entstandene Bewegung die reichlichste Gelegenheit hat, sich bis an die äufsersten

[1] Lenhossék: Der feinere Bau des Nervensystems. S. 143.

Grenzen fortzupflanzen. Die Frage ist nun die, ob wir irgend einen Beweis dafür haben, dafs eine Bewegung, die sich im Zentralorgan ausbreitet, auf andere, gleichzeitige Bewegungen einwirken kann. Dieses Problem ist der Gegenstand verschiedener physiologischer Untersuchungen gewesen, und alle Forscher scheinen hier über die Resultate einig zu sein: gegenseitige Einwirkung gleichzeitiger oder kurz nacheinander folgender Bewegungen findet immer statt, und die Einwirkung kann teils hemmend, teils bahnend sein. Eine kurze und klare Auseinandersetzung der wichtigsten hierhergehörenden Untersuchungen wurde von Goldscheider[1] gegeben; nach seiner Arbeit führe ich hier die wesentlichsten Punkte an, die für uns Bedeutung haben.

Wir nehmen jedes der beiden Verhältnisse, die Hemmung und die Bahnung, für sich, und fangen mit ersterer an, die offenbar mit der Erscheinung, für die wir eine Erklärung suchen, nämlich mit dem hemmenden Einflusse der psychischen Arbeit auf die Muskelarbeit, am nächsten verwandt ist. Die physiologischen Untersuchungen über die Hemmung beschäftigten sich ganz natürlich zunächst mit den Reflexäufserungen, da man an der Muskelbewegung ein sichtbares Anzeichen hat, ob der Reflex ungestört verlaufen ist, oder ob er möglicherweise unter gegebenen Umständen gehemmt wurde. Die Resultate, zu denen man hier gelangt ist, lassen sich in Kürze folgendermafsen angeben. Jedes Zentrum, durch welches ein bestimmter Reflexakt ausgelöst wird, verliert an Fähigkeit zum Auslösen des Reflexes, wenn es zugleich durch irgend eine Nervenbahn beeinflufst wird, die mit dem betreffenden Reflexakte nichts zu schaffen hat. Am sichersten und regelmäfsigsten wird deshalb ein Zentrum eine bestimmte Reflexfunktion ausüben, wenn seine Kommunikation mit allen anderen Zentren aufgehoben ist. Je zahlreichere Kommunikationen es dagegen mit anderen Zentren hat, um so leichter wird der Reflexakt gehemmt werden. Deshalb werden Reizungen, die bei einem Tiere mit gröfseren oder geringeren Hirndefekten

[1] Die Bedeutung der Reize für Pathologie und Therapie. Leipzig 1898. Kap. IV.

mit Leichtigkeit Reflexe auslösen, diese Reflexe beim normalen, unversehrten Tiere oft gar nicht hervorrufen[1]. Was ferner die Reizungen betrifft, durch welche die Reflexhemmungen hervorgerufen werden, so erweist es sich, dafs dieselben keineswegs begrenzter Art sind; jeder beliebige, hinlänglich starke Sinnesreiz wird gewöhnlich einen gegebenen Reflex zu hemmen vermögen. Die Hemmung scheint mithin nicht an bestimmte Bahnen gebunden zu sein; eigentlich kommt es nur darauf an, ob die Reizung des Sinnesorgans im stande ist, ihre Wirkung bis in das reflexauslösende Zentrum gelangen zu lassen. Starke Sinnesreize werden deshalb auch leichter als schwache die Reflexe hemmen können, die Stärke ist augenscheinlich aber etwas sehr Relatives, da die Leichtigkeit, mit welcher der Reiz sich den Weg bis zum Zentrum bahnt, und die Empfänglichkeit des letzteren das Wesentlichste sind. In einzelnen Fällen können daher sogar verhältnismäfsig sehr schwache Reize reflexhemmend wirken.

Diese Ergebnisse der physiologischen Untersuchungen stehen offenbar in genauester Übereinstimmung mit dem, was unsere Kenntnis des anatomischen Baues des

[1] Hiermit ist offenbar auch die Erklärung der Thatsache gegeben, deren Nachweis der Hauptinhalt des 1. Teiles vorliegender Arbeit war, dafs nämlich vasomotorische Reflexe bei normalen Menschen nicht vorkommen. Weil Störungen des Kreislaufes sich bei Tieren, deren Nervensystem durch Operation versehrt wurde, oder bei Menschen, die an entschiedenen Krankheiten der höheren Hirnzentren leiden, leicht reflektorisch hervorrufen lassen, dürfen wir darum doch nicht annehmen, dafs dergleichen Reflexe auch bei normalen Menschen vorkommen sollten, da es möglich ist, dafs die höheren Zentren stets diese Reflexe hemmen. Meine Versuche legten nun gerade dar, dafs besonders vasomotorische Störungen des Kreislaufs bei normalen Individuen nur dann zu stande kommen, wenn der auslösende Reiz bis ins Bewufstsein gelangt, oder bis in — das Bewufstseinsorgan, was man ja gern sagen kann, um die Physiologen zu erfreuen, da die erstere Ausdrucksweise ihnen gar zu »metaphysisch« deucht. Da meine Untersuchungen die ersten sind, die überhaupt über die Existenz vasomotorischer Reflexe bei normalen, unversehrten Menschen angestellt wurden, und da das angeführte Ergebnis durchaus keiner physiologischen Thatsache widerstreitet, begreife ich nicht, weshalb ein bekannter Physiolog wegen dieser Sache hysterische Anfälle bekommen hat. Sollte dies vielleicht seinen Grund darin haben, dafs es einer der verachteten Psychologen ist, der die Physiologie um eine wohlbegründete Thatsache bereichert hat?

Gehirns uns gelehrt hat. Einerseits sehen wir, wie das Organ so gebaut ist, daſs die Reizung eines einzelnen Punktes die Möglichkeit hat, sich über das Ganze auszubreiten; anderseits erfahren wir, daſs ein solches Ausbreiten meistens auch wirklich stattzufinden scheint, indem ein Sinnesreiz jeder beliebigen Art einen gleichzeitigen Reflexakt zu hemmen vermag. In völliger Übereinstimmung hiermit befindet sich ferner das Resultat unserer psychologischen Untersuchungen, indem wir sahen, daſs eine psychische Thätigkeit sehr verschiedener Art (Denken, Gedächtnisarbeit) die Muskelarbeit, die zugleich willkürlich verrichtet wird, vermindert, d. h. sie hemmt. Wir können daher die Resultate unserer auf ergographischem Wege ausgeführten Bestimmungen den physiologischen Erforschungen der Reflexhemmung direkt unterordnen:

Wie eine Reflexäuſserung bei einem Tiere mit gröſserem oder geringerem Defekt des Gehirns durch irgend einen gleichzeitigen Sinnesreiz gehemmt werden kann, so wird auch die von einem normalen Individuum ausgeführte willkürliche Muskelarbeit durch eine gleichzeitige psychische Thätigkeit verschiedener Art gehemmt werden.

Hierbei brauchen wir aber doch nicht stehen zu bleiben; ohne Zweifel können wir noch eine gute Strecke weiter kommen. Wie die Reflexhemmung vorgeht, wie die Bewegung, die das Reflexzentrum trifft, im stande sein kann, die auf anderem Wege eingeleitete Reflexäuſserung zu hemmen, darüber haben die Physiologen bis jetzt nichts anzugeben vermocht; sie haben sich darauf beschränkt, die Thatsache zu konstatieren. Hier scheinen die ergographischen Bestimmungen ergänzend hinzuzutreten. Gibt es keinen fundamentalen Unterschied zwischen der Hemmung der willkürlich verrichteten Muskelarbeit durch die psychische Thätigkeit und der Hemmung der Reflexäuſserung durch den Sinnesreiz, so wird die für den einen Fall gültige Erklärung sich auch auf den anderen übertragen lassen. Nun legten wir aber im Vorhergehenden dar, daſs die Hemmung der Muskelarbeit durch psychische Arbeit Gesetzen gemäſs vorgeht, die durchaus keinen spezifisch physio-

logischen Charakter haben. Dieselben sind rein physischer Art, ganz dieselben, die für jede gegenseitige Einwirkung der von derselben Kraftmaschine ausgeführten Arbeiten gelten. Ist dies aber in solchen Fällen gültig, wo psychische Thätigkeit mitbeteiligt ist, so würde es doch höchst sonderbar sein, wenn es nicht auch von den weit mehr maschinenmäfsigen Reflexäufserungen gelten sollte. Die Annahme dürfte daher wohl kaum als zu gewagt erscheinen, dafs alle verschiedenen Hemmungen, die rein physiologischen sowohl als die psychophysiologischen, ganz derselben Art wären, denselben Gesetzen gehorchten und sich deshalb auf dieselbe Weise erklären liefsen. Was die Erklärung betrifft, so ist diese bereits insofern im Vorhergehenden gegeben, als wir sahen, dafs die Hemmung durchaus keine speziell physiologische Erscheinung ist; soll eine Maschine für zwei Arbeiten zugleich Energie liefern, so wird stets jede derselben kleiner, als sie geworden wäre, wenn sie allein verrichtet würde. Zurück steht also nur die Erörterung, wie wir uns auf Grundlage unserer heutigen Kenntnis des Zentralorgans das Stattfinden solcher wechselseitigen Einwirkung zweier gleichzeitiger Energieentladungen im Gehirn zu denken haben.

Am leichtesten gelangen wir zu einem Verständnisse der Verhältnisse, wenn wir uns eine Bewegung im Zentralorgane von aufsen her, durch einen Sinnesreiz in Gang gesetzt denken. Was wir hiermit besprechen werden müssen, ist doch kein spezieller Fall, denn alle psychische Thätigkeit ist früher oder später, direkt oder indirekt, durch äufsere Einwirkungen auf den Organismus hervorgerufen, und es liegt kein Grund für die Vermutung vor, dafs der Energieumsatz in den Neuronen anderer Art werden sollte, weil die ursprüngliche Ursache der Bewegung in der Zeit weiter zurück liegt. Wir gehen also von einem Sinnesreize aus, wodurch es uns möglich wird, die weitere Erörterung unmittelbar an das oben über die Veränderungen im Sinnesnerv Aufgestellte (S. 181—82) zu knüpfen. Die elektrolytische Bewegung, aus welcher der Nervenstrom besteht, bewirkt eine Wanderung positiv geladener Ionen nach der gereizten Stelle des Nervs, während negative Ionen nach dem Zentralorgane hin gedrängt

werden. Die von den Veränderungen des Sinnesnervs unmittelbar getroffene Gruppe von Neuronen wird folglich in ihrer Beziehung zu den Umgebungen negativ elektrisch. Diese Potenzialsenkung wird zur Folge haben, daſs aus den Stellen mit höherem Potenzial Energie nach der Stelle mit niederem Potenzial strömt, oder mit anderen Worten: die im Nerv vorgehende Bewegung pflanzt sich intercellulär weiter zu allen denjenigen Neuronen fort, mit welchen die ursprünglich gereizten im Kontakt stehen. Die Bewegung wird sich also mit immer mehr abnehmender Stärke nach auſsen verbreiten. Je gröſser die Potenzialsenkung ist, oder je gröſser die Anzahl der Neuronen ist, deren Potenzial ursprünglich vermindert wurde, um so stärker wird auch der Strom nach einem solchen Arbeitszentrum werden. Entsteht nun gleichzeitig ein zweites Arbeitszentrum im Zentralorgane, so muſs der Umstand, daſs die disponible Energie beschränkt ist, zur Folge haben, daſs die beiden Ströme sich gegenseitig schwächen[1]. Die nach dem einen Zentrum strömende Energie wird dem anderen einfach genommen. Die Verhältnisse sind offenbar denjenigen ganz analog, welche uns vom Springbrunnenapparate bekannt sind: der Zufluſs nach der einen Röhre wird dadurch vermindert, daſs der anderen Wasser entströmt.

Es ist also nicht ganz unverständlich, wie gleichzeitige Bewegungen im Gehirn aufeinander influieren können. Trotz des komplizierten Baues des Organs ist dasselbe dennoch den allgemeinen physischen Gesetzen unterworfen, und die Verhältnisse lassen sich daher mit denjenigen parallelisieren, die wir von unseren Maschinen kennen. Weniger verständlich ist es, wie es möglich wird, daſs ein solcher Energiestrom nicht alle Funktionen des Gehirns auf einmal auslöst. Man müſste ja fast erwarten, daſs ein einzelner Sinnesreiz z. B. alle Vorstellungen auslösen würde, die das Bewuſstsein des Individuums überhaupt zur Verfügung hat; dies geschieht aber doch nicht. Die Schwierigkeit, die uns hier

---

[1] Natürlich braucht die eine Arbeit keine motorische zu sein; Vogts früher (S. 215) erwähnte Versuche zeigen, daſs auch zwei psychische Arbeiten sich gegenseitig hemmen.

aufstöſst, haben auch die Anatomen und die Physiologen gewahrt, welche verschiedene Ansichten aufgestellt haben, um über dieselbe hinwegzukommen. So meint Lenhossék, die einzelnen Neuronen seien für verschiedene Arten der Bewegung abgestimmt[1]; Goldscheider betrachtet die Empfänglichkeit der verschiedenen Zellen für gegebene Bewegungen als verschieden[2]. In der Realität scheinen diese Erklärungen ungefähr dasselbe zu sagen, da die verschiedene Empfänglichkeit ja doch zunächst darauf beruhen muſs, daſs nicht alle Neuronen für jede Art der Bewegung gleich gut geeignet sind. Und trotz der elektrolytischen Natur der Bewegungen müssen diese doch wesentliche Verschiedenheiten darbieten. Zwei verschiedene Farbenstrahlen können z. B. in der Netzhaut keine Nervenströme auslösen, die nur an Stärke verschieden wären, denn es wäre dann unbegreiflich, wie sie verschiedene Farbenempfindungen verursachen können. Worin die Verschiedenheit der Nervenströme besteht, das ist uns natürlich durchaus unbekannt. Es ist aber jedenfalls zulässig, sich zu denken, die Verschiebung der Ionen geschehe nicht kontinuierlich, sondern stoſsweise mit verschiedener Periode, von der Natur der verschiedenen Reizungen abhängig. Etwas Ähnliches muſs ja ebenfalls stattfinden, wenn man durch einen Elektrolyt eine Reihe regelmäſsiger, schnell aufeinanderfolgender Stromstöſse sendet; es muſs dann gleichfalls eine periodische Verschiebung der Ionen vorgehen. Übrigens ist es einerlei, wie man sich die Sache denken möchte; das Wesentliche ist, daſs zwischen den zum Gehirn fortgepflanzten Nervenbewegungen Verschiedenheit bestehen muſs. Sind nun nicht alle Neuronen gleich empfänglich für jede periodische Bewegung, so wird diese sich freilich bis zu allen fortpflanzen, nur in einzelnen wird sie aber so groſse Stärke erreichen, daſs sie die spezielle Funktion des Neurons auszulösen vermag. Unleugbar ist dies eine rein hypothetische Erklärung, für die wir nicht den geringsten Beweis beizubringen im stande sind, da aber weiter nichts damit bezweckt

[1] L. c. S. 143.
[2] L. c. S. 8.

ist, als zu zeigen, wie die thatsächlich bestehenden Verhältnisse sich überhaupt als möglich denken lassen, können wir gern hierbei stehen bleiben.

Es erübrigt noch, das andere Verhalten zu erörtern, das zwischen gleichzeitigen Bewegungen im Zentralnervensystem eintreten kann, nämlich deren gegenseitige Bahnung. Auch diese ist von verschiedenen Physiologen zunächst mittels der Reflexbewegungen untersucht worden. Die Erscheinung äufsert sich im Gegensatz zur Hemmung dadurch, dafs eine Bewegung in einem Reflexzentrum einer anderen, gleichzeitigen oder kurz darauf eintretenden Bewegung den Weg bahnen, dieselbe verstärken oder fördern kann, so dafs letztere einen Reflex auszulösen vermag, wozu sie ohne Hilfe der ersteren sonst nicht fähig sein würde. Mit Bezug auf die Bedingungen für das Eintreten einer Bahnung zeigen die Versuche, dafs durchweg nur schwache und kurze Reizungen bahnend wirken. So wird die künstliche Reizung eines Reflexzentrums für einen Sinnesreiz bahnend wirken können, der durch dieses Zentrum den Reflex auslöst, oder umgekehrt, der Sinnesreiz kann für die künstliche Reizung des Zentrums bahnend wirken. Ebenfalls findet man, dafs der erste Sinnesreiz für den folgenden derselben Art bahnend wirkt; aufserdem hat man Beispiele, dafs zwei Reize, die gar nichts miteinander zu thun haben, wie z. B. ein Schallreiz und eine Berührung, einander unterstützen können. Die Reizung der Vorderpfote eines Tieres kann für eine Reizung der Hinterpfote bahnend wirken, ebenfalls eine Reizung der linken für die der rechten Pfote. Diese Versuche zeigen, dafs jeder Reiz, je nach den Umständen, bahnend oder hemmend wirken kann; welches Resultat er erzeugt, beruht zunächst auf seiner Stärke und Dauer. Dies ist nach der Erklärung der Hemmung, die wir oben gaben, denn auch leicht zu verstehen. Ist ein Reiz so stark und andauernd, dafs er einen starken intercellulären Energiestrom nach einem bestimmten Punkte des Zentralorgans hervorruft, so wird dieser Strom auf andere gleichzeitige Bewegungen notwendigerweise hemmend wirken. Ist der Reiz aber nur schwach und kurz, so wird der im Zentralorgan hervorgerufene Strom seiner geringen

Stärke wegen keinen merklichen hemmenden Einfluſs üben können. Die Verhältnisse sind offenbar ganz denen analog, die wir vom Springbrunnenapparate kennen; öffnen wir eine weite Röhre, so nimmt die Steighöhe merklich ab, wogegen es keinen nachweisbaren Einfluſs erhält, daſs wir ein Haarröhrchen öffnen. Ein Strom im Gehirn wird aber doch nicht ganz ohne Bedeutung, selbst wenn er nicht hemmend wirkt. Denn er erzeugt stets schwache Veränderungen in den Neuronen, und kommt nun an einem einzelnen Punkte ein Stoſs von anderer Seite, so wird dieser Reiz sich zu der schon bestehenden Bewegung addieren, und dies kann genügen, um die Funktionen des Neurons auszulösen. Auf diese Weise hat ersterer Reiz mithin dem letzteren die Bahn bereitet.

Bei der Bahnung handelt es sich nun augenscheinlich um eine Summation von Reizen — darüber scheinen die Physiologen auch einig zu sein. Dieses Vermögen, die Reize zu summieren, das eine konstante Eigenschaft der Nervenzellen ist, steht jedoch nicht als eine so rätselhafte Erscheinung da, wie sie gewöhnlich dargestellt wird. Die Arbeit der Nervenzellen ist durch eine elektrolytische Dissociation bedingt; diese macht deren Energie frei. Wie jeder chemische Prozeſs erfordert die Dissociation aber ganz bestimmte Bedingungen, um überhaupt zu stande zu kommen, eine bestimmte Intensität des dissociierenden Reizes u. s. w.; deshalb hat jedes einzelne Neuron seinen Schwellenwert (Goldscheider), den der Reiz übersteigen muſs, damit die Funktion des Neurons ausgelöst werden kann. Wie die notwendigen Bedingungen aber herbeigeschafft werden, muſs für das Eintreten der Wirkung ganz gleichgültig sein. Verlangt ein Stoff z. B. eine bestimmte Temperatur, um dissociiert zu werden, so macht es keinen Unterschied, ob man die ganze erforderliche Wärmemenge auf einmal zuführt, oder ob die Temperatur durch eine Reihe successiver kleiner Zufuhren von Wärme gesteigert wird. Wenn nur der zeitliche Zwischenraum kein so langer ist, daſs der Körper die empfangene Wärme wieder abgeben kann, bevor neue Zufuhr eintrifft, wird man auch auf diese Weise die Dissociation zu stande bringen können. Bei einem

solchen rein chemischen Versuche würde man ganz gewifs mit vollem Recht von einer Summation der Reize reden können. Auf rein physischem Gebiete hat man übrigens dasselbe; ein Körper kann durch einen einzelnen kräftigen Stofs oder durch eine Reihe kleiner taktfester Stöfse in Schwingung gesetzt werden. Hier findet also ebenfalls eine Summation statt. Diese Erscheinung ist mithin nichts den Nervenzellen Eigentümliches; unter allen Verhältnissen, wo die durch einen Reiz hervorgerufene Zustandsänderung nicht aufgehört hat, bevor ein neuer gleichartiger Reiz eintrifft, wird eine Summation stattfinden. Es liegt also nichts sehr Sonderbares darin, dafs zwei Bewegungen, die mit kurzen Zwischenräumen ein Neuron treffen, sich summieren und verstärken. Ebenso wie die Hemmung ist die Bahnung also nur eine spezielle Äufserung bekannter physischer Gesetze.

Kennen wir nun auf dem psychischen Gebiete irgend eine der Bahnung verwandte Erscheinung? Dies ist wohl nicht zu bezweifeln. Unsere ergographischen Messungen zeigten uns, dafs eine und dieselbe psychische Thätigkeit um so gröfseren Energieverbrauch beanspruchen wird, je mehr die Aufmerksamkeit auf die Thätigkeit konzentriert ist. Hieraus geht also direkt hervor, dafs die Aufmerksamkeit von gesteigertem Energieumsatz in einem Arbeitszentrum begleitet wird. Die psychische Wirkung des gröfseren Energieverbrauchs wird primär die sein, dafs die betreffenden Vorstellungen deutlicher hervortreten, und sekundär wird der starke Energiezuflufs zum arbeitenden Zentrum zur Folge haben, dafs alle anderen gleichzeitigen Bewegungen im Zentralorgan gehemmt werden. Die bekannten Wirkungen, die wir der Aufmerksamkeit zuschreiben, lassen sich also erklären, wenn die Aufmerksamkeit als eine Verstärkung einer bestimmten Bewegung im Zentralorgan aufgefafst wird, als eine Bahnung in Analogie mit der von den Physiologen nachgewiesenen Bahnung von Reflexbewegungen.

Es wird also nur fraglich, was denn die Bahnung bewirkt. Die Aufmerksamkeit ist es natürlich nicht, denn da diese selbst die psychische Wirkung der stattfindenden Bahnung ist, kann sie selbstverständlich nicht

wohl deren Ursache sein. Die Selbstbeobachtung zeigt uns hier klar und deutlich, wie sich die Sache verhält. Was die Bahn bereitet oder die Konzentration der Aufmerksamkeit herbeiführt, ist stets das Interesse, eine Gruppe gefühlsbetonter Vorstellungen, welche alle an eine bestimmte Vorstellung gebunden sind, die sie deshalb im Verein reproduzieren. Gerade weil diese Vorstellung »Interesse hat«, und weil sie von mehreren Seiten zugleich hervorgerufen wird, tritt sie besonders deutlich hervor, im Gegensatze zu anderen gleichzeitig reproduzierten Vorstellungen, die nur mit einzelnen der vorhergehenden Vorstellungen Anknüpfung haben. Mit fast handgreiflicher Deutlichkeit erweist die Aufmerksamkeit sich als eine Bahnung, wenn es irgend etwas zu Beobachtendes ist, woran sich das Interesse knüpft. Alsdann entsteht gewöhnlich vor der sinnlichen Wahrnehmung ein Erinnerungs- oder Phantasiebild dessen, was man wahrzunehmen erwartet. Hier zeigt uns die Selbstbeobachtung also geradezu, dafs von vornherein eine Bewegung eben der Art erregt ist, die der Sinnesreiz der Erwartung nach herbeiführen wird. Dafs hiermit aufserdem eine Einstellung der Sinnesapparate auf den erwarteten Reiz verbunden ist, mag der Vollständigkeit wegen noch bemerkt werden. Das Zentrale der Aufmerksamkeit ist aber doch die durch das Interesse bewirkte Verstärkung der Vorstellung, was physiologisch geredet nur heifst, dafs vorhergehende Bewegungen im Zentralorgan im Verein eine Bewegung an einem neuen Punkte anbahnen, weshalb der Energieumsatz hier besonders stark wird. — Das Ergebnis dieser Betrachtungen wird also:

Die Erscheinungen, die psychologisch gewöhnlich als Folgen der Konzentration der Aufmerksamkeit in bestimmter Richtung ausgelegt werden, sind leicht als Resultat einer Bahnung, einer Summation von Bewegungen in einem einzelnen Zentrum zu erklären, die durch vorhergehende psychophysiologische Zustände (»das Interesse«) hervorgerufen wurde. Die Bahnung bewirkt unmittelbar einen vermehrten Energieumsatz im betreffenden Zentrum, der die an die

Bewegung gebundenen psychischen Zustände mit gröfserer Stärke und Deutlichkeit hervortreten läfst. Ferner wird der vermehrte Energieverbrauch eine starke Energiezufuhr zum arbeitenden Zentrum veranlassen, weshalb andere gleichzeitige Bewegungen im Zentralorgane in gröfserem oder geringerem Grade gehemmt werden, so dafs die im Arbeitszentrum ausgelösten psychischen Zustände im Bewufstsein mehr oder weniger alleinherrschend werden.

An einem wesentlichen Punkte trifft diese Erklärung mit der Hypothese zusammen, die ich bereits vor zehn Jahren näher entwickelte[1], dafs nämlich die Aufmerksamkeit als die psychische Folge eines vermehrten Energiezuflusses zum arbeitenden Zentrum aufzufassen sei. Die ältere Hypothese enthielt indes den Fehler, dafs das Blut als Träger der Energie betrachtet wurde, so dafs die Aufmerksamkeit näher bestimmt auf einer vermehrten Blutzufuhr zum Arbeitszentrum beruhen mufste. So stark lokalisierte vasomotorische Veränderungen, wie diese Auffassung sie erforderte, sind jedoch wohl kaum physiologisch möglich, und somit wird die Hypothese unhaltbar. In dieser Beziehung hat die oben gegebene Darstellung einen unbestreitbaren Vorzug, indem sie wohl keine einzige rein hypothetische Annahme enthält, sondern sich durchweg auf festgestellte physiologische und psychologische Thatsachen stützt. Da ein sehr grofser Teil der Untersuchungen, die das solide Fundament der neuen Auffassung abgaben, indes erst im Laufe des letzten Dezenniums erschien, ist es leicht verständlich, dafs ich mich mit einer zweifelhaften Hypothese begnügen mufste, während wir jetzt, wenn wir die Erfahrungen aus vielen verschiedenen Gebieten miteinander zusammenhalten, mit nicht geringer Sicherheit den wirklichen Zusammenhang der Sache nachzuweisen vermögen.

Die zeitliche Verschiebung gleichzeitiger Reizungen bei der Aufmerksamkeit. Aus der im Vorhergehenden

[1] Die Hypnose und die damit verwandten normalen Zustände. Leipzig 1890. S. 26.

dargestellten Erklärung der Aufmerksamkeit läfst sich eine recht sonderbare Konsequenz herleiten, dafs nämlich zwei gleichzeitige Erregungen verschiedener Sinnesorgane nicht gleichzeitig zum Bewufstsein kommen können, wenn die Aufmerksamkeit auf eine derselben konzentriert wird. Damit eine Empfindung zum Bewufstsein gelange, ist, wie wir sahen, in einem bestimmten Zentrum ein Energieumsatz von gewisser Gröfse erforderlich. Ist die Aufmerksamkeit nun auf eine erwartete Reizung *A* gerichtet, so ist die entsprechende Bewegung im Zentralorgan vorher angebahnt, und folglich mufs diese Bewegung geschwinder ihre volle Gröfse erreichen, wenn *A* eintritt, als die gleichzeitig erregte Bewegung *B*, die nicht angebahnt wurde. Die psychische Folge hiervon mufs daher die werden, dafs der Reiz *A* früher als *B* einzutreffen scheint, obschon sie die Sinnesorgane faktisch in demselben Momente treffen. Dafs diese Konsequenz der Theorie sich mit der Erfahrung in Übereinstimmung befindet, wies Weyer[1] nach. Er sagt: »Was die Kurven uns zeigen, ist, in Worten ausgedrückt, dafs, wenn die Aufmerksamkeit auf irgend einem der beiden Reize ruht, der andere Reiz, wenn er dem fixierten in einem nicht zu grofsen Intervall vorangeht, als nachfolgend wahrgenommen wird[2].« Hieraus geht also hervor, dafs der Reiz *B*, auf den die Aufmerksamkeit nicht gerichtet ist, scheinbar nach *A* kommen wird, nicht nur, wenn sie faktisch gleichzeitig sind, sondern sogar auch, wenn *B* ein wenig vor *A* kommt; nur darf der Zwischenraum natürlich kein gar zu grofser sein. Die von Weyer gegebene Erklärung der Sache ist ganz kurz gefafst und unklar; da wir das wirkliche Verhältnis kennen, haben wir keinen Grund, uns näher hierauf einzulassen. Ebensowenig werde ich mich hier mit den übrigens richtigen Versuchen des genannten Forschers beschäftigen, da ich es vorziehe, zur ferneren Bestätigung der Sache mein eignes auf eine von der Weyerschen abweichende Methode gewonnenes Versuchsmaterial darzustellen.

---

[1] Die Zeitschwellen gleichartiger und disparater Sinneseindrücke. Phil. Stud. Bd. XIV u. XV.

[2] L. c. Bd. XV. S. 136—137.

Zu Untersuchungen über die Auffassung gleichzeitiger, disparater Sinnesreize konstruierte ich vor mehreren Jahren den unten beschriebenen Apparat. Gleich bei den ersten Versuchen mit demselben (wohl im Frühjahr 1893) zeigte es sich, wie es ausschliefslich von der Richtung der Aufmerksamkeit abhängt, welcher von zwei gleichzeitigen Reizen zuerst zum Bewufstsein kommt. Später ist der Apparat wiederholt zur Anwendung gekommen, weil ich fand, dafs derartige Versuche sich besonders dazu eigneten, Anfänger in dem Konzentrieren der Aufmerksamkeit nach bestimmter Richtung trotz distrahierender Einwirkungen zu üben. Es erweist sich nämlich empirisch, dafs nicht jedermann ohne weiteres dazu fähig ist, selbst wenn die Reize ganz gleichgültig sind, so dafs das Individuum durchaus kein Interesse daran hat, einen dem anderen vorzuziehen. Eben die Verhältnisse, unter denen der eine Reiz gegeben ist, können für die Lenkung der Aufmerksamkeit entscheidend sein, so dafs viele Menschen geradezu belehrt, erzogen werden müssen, wie sie die Aufmerksamkeit nach anderer Richtung lenken sollen. Es traf sogar ein, dafs es einzelnen Versuchspersonen nie gelang, sich von dem dominierenden Einflusse des einen Reizes zu befreien; trotz aller Anstrengung, um den anderen Reiz festzuhalten, schwankte die Aufmerksamkeit dennoch fortwährend hin und her. Dies war natürlich aber nur ausnahmsweise; die meisten lernen verhältnismäfsig schnell die Aufmerksamkeit nach bestimmter Richtung konzentrieren, und sobald dies erreicht ist, geben die Versuche konstante Resultate. Die häufige Wiederholung dieser Versuche hat im Laufe der Jahre ein nicht geringes Material geliefert, das in verschiedenen Beziehungen Interesse darbietet. Ich werde mich indes nicht näher auf die verschiedenen Fragen einlassen, die eine vollständige Bearbeitung des Materials hervorrufen könnte, sondern mich darauf beschränken, solche Versuchsreihen hervorzuziehen, welche die genannte Frage direkt erhellen.

Der angewandte Apparat ist in der Fig. 7 in zwei Projektionen gezeigt. Derselbe besteht aus einer Achse *A*, die mit geringer Friktion in dem von den Ständern *PP* getragenen Lager *L* läuft. An der Achse ist eine

Scheibe *S* befestigt; um diese und um eine entsprechende Scheibe an einem Kymographen ist ein Schnurtrieb gelegt, mittels dessen die Achse in Umdrehung gesetzt wird. Ferner trägt die Achse die Friktionsscheibe *F*, gegen welche die Bremse *B* wirkt. Die Bremse dreht sich um einen Zapfen bei *U*, wenn der an deren anderem Ende befindliche Anker vom Elektromagnet *E* angezogen wird. Aufserdem trägt die Achse an jedem Ende einen Zeiger, *Z* und *V*, die in jeden beliebigen Winkel zu einander gestellt werden können und sich

Fig. 7.

in jeglicher Stellung durch Mutterschrauben an der Achse festhalten lassen. Beide Zeiger sind durch Kontragewichte so abbalanciert, dafs ihre Schwerpunkte in die Umdrehungsachse fallen; hierdurch erzielt man, dafs ihre gegenseitige Stellung zu einander keinen Einflufs auf die Umdrehung erhält. Der Zeiger *V* ist eine leichte, steife hölzerne Stange, die sich vor dem Schirm *C* bewegt, an welchem ein in 60 Teile eingeteilter Kreis angebracht ist; das Zentrum des Kreises liegt in der Umdrehungsachse des Zeigers. Der Zeiger *Z* ist aus Metall und mit einer Spitze aus Platin versehen. Während seiner Umdrehung passiert er durch die mit Quecksilber gefüllte Ebonitschale *T* und schliefst somit einen Strom, der von der einen Klemmschraube *K* durch den

Ständer *P* nach dem Zeiger, von hier durch das Quecksilber in *T* und den Elektromagnet *E* nach der anderen Klemmschraube *K* zurückgeht. In dem Augenblick, da der Elektromagnet den Anker der Bremse *B* anzieht, wird das andere Ende derselben gegen *F* andrücken, wodurch die Bewegung der Zeiger augenblicklich stockt, wenn nur der elektrische Strom hinlänglich stark ist. Schaltet man zwischen den Elektromagnet und dessen Anker ein Stückchen Holz von passender Dicke ein, so wird die Bremse verhindert, auf die Friktionsscheibe zu wirken, und dann setzt sich die Umdrehung unverändert fort trotz der Schliefsung des Stromes, wenn *Z* durch das Quecksilber passiert. Wird daher in die Stromleitung ein Signalhammer eingeschaltet, so gibt dieser jedesmal, wenn der Strom geschlossen wird, ein Schallsignal; darum braucht die Umdrehung aber nicht zu stocken, denn dies geschieht erst, wenn der Hemmer zwischen dem Elektromagnet und dessen Anker entfernt wird.

Die Anwendung des Apparats ist nun leicht zu verstehen. Der Leiter des Versuchs befindet sich an derjenigen Seite des Schirmes *C*, an welcher der Zeiger *Z* rotiert; an der entgegengesetzten Seite haben die Versuchspersonen ihren Platz. Diese sehen also, wie sich der Zeiger *V* über den eingeteilten Kreis bewegt. Wenn *Z* das Quecksilber in *T* berührt, fällt das Schallsignal, und es ist nun die Aufgabe der Beobachter, zu entscheiden, bei welcher Stellung des Zeigers *V* der Schall eintraf. Dies läfst sich der Erfahrung gemäfs nicht sogleich beurteilen; man mufs mehrmals den Schall bei derselben Stellung des Zeigers gehört haben, bevor man ein entschiedenes Urteil zu fällen vermag. Ist die V-P zu einem endlichen Resultate gelangt, so notiert sie dies und benachrichtigt den Experimentator, dafs sie fertig ist. Der Experimentator entfernt hierauf den Hemmer zwischen dem Elektromagnet und dessen Anker, worauf die Rotation bei der nächsten Stromschliefsung stockt. Alsdann liest man die Stellung des Zeigers *V* ab, bei der das Schallsignal thatsächlich eintraf.

Hierbei sind indes noch verschiedene Umstände zu berücksichtigen. Es ist nämlich nicht notwendigerweise

gegeben, dafs der Zeiger eben in demselben Augenblicke stockt, in welchem das Schallsignal eintrifft. Ist das Inertiemoment der rotierenden Teile nur gering, die Friktionsscheibe grofs und der Elektromagnet hinlänglich stark, so ist nichts im Wege, dafs die Bewegung der Zeiger ohne zu schleppen plötzlich in dem Momente stocken kann, da die Bremse an die Friktionsscheibe anschlägt. Es gilt also nur, sich zu vergewissern, dafs die Bremse und der Signalhammer, die beide durch den Strom in Gang gesetzt werden, auch zu gleicher Zeit wirken. Da der Inertiewiderstand beider dieser Apparate zu überwinden ist, und da die beweglichen Teile verschiedene Strecken zu durchlaufen haben, müssen daher besondere Mafsregeln getroffen werden, damit der Anschlag des Hammers an die Glocke und die Einwirkung der Bremse auf die Friktionsscheibe gleichzeitig eintreffen. Zu diesem Zwecke finden sich an beiden Apparaten schraubenförmige Federn, *F* (siehe Fig. 7 u. 8), die angespannt oder schlaff gemacht werden können, wodurch man die Bewegungen der Hebelarme geschwinder oder langsamer zu machen im stande ist. Man ändert also die Spannung dieser Federn so lange, bis die beiden Anschläge, der der Bremse und der des Signalhammers, als ein einziger gehört werden; dann ist man sicher, dafs der Zeiger wirklich in demselben Augenblicke stockt, da der Schall gehört wird.

Fig. 8.

Die Umdrehungsgeschwindigkeit der Zeiger läfst sich teils dadurch variieren, dafs man den Gang des Kymographen verändert, teils durch Anwendung verschiedener Schnurscheiben an der Achse des Kymographen. Auf diese Weise kann man die Umdrehungsgeschwindigkeit ungefähr so klein machen, wie man will; in dieser Richtung gibt es eigentlich keine Grenze, nur wird die sehr geringe Geschwindigkeit wegen der ungleichartigen Friktion mithin auch verhältnismäfsig unregelmäfsig. In der Richtung der maximalen Geschwindigkeit dagegen steckt die Konstruktion des Apparats eine bestimmte Grenze ab. Da nämlich von

dem Augenblicke an, da der Strom geschlossen wird, bis die Bremse wirkt, gewisse Zeit verstreicht, so wird der Zeiger *Z* notwendigerweise eine um so längere Strecke durch das Quecksilber zurücklegen, je gröfser die Geschwindigkeit der Zeiger ist. Bei sehr grofser Rotationsgeschwindigkeit wird es daher eintreffen können, dafs *Z* aufser Kontakt mit dem Quecksilber gekommen ist, bevor die Bremse ihre Wirkung geübt hat, und dann kann der Strom die Bewegung folglich gar nicht hemmen. Dies traf bei einer Umlaufszeit von 0,9 Sek. ein; es war deshalb nicht thunlich, die Geschwindigkeit gröfser als einen Umlauf pr. Sek. zu machen, welche übrigens auch völlig genügte. Nimmt man einen gröfseren Quecksilbernapf, so kann man natürlich auch gröfsere Geschwindigkeit anwenden.

Bei meinen Versuchen kamen stets fünf bestimmte Umlaufszeiten zur Anwendung, nämlich 1,0—1,7—2,8—5,9 und 10,0 Sek. Mit jeder dieser Zeiten wurden an jeder V-P zehn Versuche angestellt, indem nach jedem einzelnen Versuche die gegenseitige Stellung der Zeiger verändert wurde, so dafs die V-P nie vorher wissen konnte, bei welcher Stellung des Zeigers *V* das Schallsignal zu erwarten sei. Die Aufgabe der V-P war in allen Fällen dieselbe, nämlich die Schätzung, auf welchem Teilstriche der Zeiger beim Hören des Signales stand. Diese Schätzung wurde aber unter zwei verschiedenen subjektiven Bedingungen abgegeben. In einer Versuchsreihe hatte die V-P ihre Aufmerksamkeit ausschliefslich auf den Zeiger zu konzentrieren und das Schallsignal kommen zu lassen, wie es sich nun treffen möchte. In einer anderen Reihe sollte die Aufmerksamkeit auf das erwartete Signal konzentriert werden, während die Augen mit möglichst geringer Aufmerksamkeit die Bewegung des Zeigers verfolgten. Der Kürze wegen nenne ich den ersteren Fall die »visuelle«, letzteren die »auditive« Aufmerksamkeit. In zwei anderen Versuchsreihen, die übrigens nur mit zwei Versuchspersonen angestellt wurden, wandte ich statt des Schallsignals einen Schlag auf die Hand an. Der Signalhammer diente zur Erzeugung dieses Schlages. Die Glocke *K* (siehe Fig. 8) wurde abgeschraubt, und die V-P brachte an deren Platz ihre Hand an, indem sie

mit der Hand den Ständer *S* umfaſste. Beim Niederschlagen trifft der Hammer jetzt die Hand, und statt einer Schallempfindung erhält man eine Tastempfindung. Mittels dieser Anordnung wurde ebenfalls eine doppelte Versuchsreihe durchgeführt, teils mit visueller, teils mit »taktiler« Aufmerksamkeit. Im ersteren Falle war die Aufmerksamkeit also auf den Zeiger, im letzteren auf die erwartete Tastempfindung konzentriert.

Als unmittelbares Resultat der Versuche gehen nun die längst bekannten Thatsachen hervor, daſs 1) gewöhnlich eine Verschiebung der Reize stattfindet, indem das Signal (der Schall oder die Berührung) nicht bei derjenigen Stellung der Zeiger aufgefaſst wurde, bei welcher es thatsächlich eintraf, 2) daſs diese Verschiebung bald positiv (in der Umlaufsrichtung des

Fig. 9.

Zeigers), bald negativ ist, und 3) daſs die Verschiebung gewöhnlich von der Rotationsgeschwindigkeit abhängig ist[1]. Das Neue, das aus den Versuchen hervorgeht, ist die oben berührte Eigentümlichkeit, daſs die Richtung der Verschiebung ausschlieſslich durch die Richtung der Aufmerksamkeit bestimmt wird. Ist die Aufmerksamkeit visuell, auf den Zeiger gerichtet, so wird die Verschiebung stets positiv sein, d. h., das Signal wird gleichzeitig mit einer späteren Stellung des Zeigers als derjenigen, mit welcher es thatsächlich gleichzeitig war, aufgefaſst. Ist die Aufmerksamkeit dagegen auf das Signal gerichtet, also entweder auditiv oder taktil, so wird die Verschiebung negativ, d. h., das Signal wird bei einer früheren Stellung des Zeigers aufgefaſst als derjenigen, mit welcher es wirklich gleichzeitig eintraf. Dies stimmt ganz mit unseren theoretischen Erwartungen und mit Weyers Versuchen überein, wie sich mittels einer bildlichen Darstellung leicht nachweisen läſst. In der Fig. 9 sei die Linie *AB* die laufende

[1] Wundt: Phys. Psych. II. Aufl. 4. S. 394 u. f.

Zeit; die kleinen Querstriche bezeichnen die successiven Stellungen des Zeigers, welche die Einteilungen des Kreisringes verdecken. Der angebrachte * gibt an, wo das Schallsignal eintritt. Die Frage ist nun die, wann diese verschiedenen Sinnesreize zum Bewufstsein gelangen. Da die Nervenleitung aus dem Sinnesorgane bis zum Gehirn stets einige Zeit erfordert, leuchtet es ein, dafs die Empfindung nicht in demselben Moment entstehen kann, in welchem das Sinnesorgan gereizt wird. Der Lichtreiz A wird also erst ein wenig später ein Gesichtsbild hervorrufen; diesen Zeitpunkt mag C bezeichnen. Alle folgenden Stellungen des Zeigers kommen daher um ebensoviel später zum Bewufstsein; dies ist in der Figur durch die schrägen parallelen Linien angegeben, welche AB mit CD verbinden. Nehmen wir nun an, dafs die Aufmerksamkeit visuell, auf die Bewegung des Zeigers gerichtet war, so sollen der Theorie zufolge die Lichtreize verhältnismäfsig geschwind zum Bewufstsein kommen, während das Schallsignal längere Zeit erfordern soll. Dies ist in der Figur dadurch angegeben, dafs die schräge Linie *E länger als die mit AC parallelen ist. Das Schallbild entsteht also erst im Zeitmomente E, zu diesem Zeitpunkte entsteht aber zugleich das Gesichtsbild einer Zeigerstellung L, die faktisch erst weit später eintraf als das Schallsignal bei *. Die Theorie verlangt, dafs der Lichtreiz, auf den die Aufmerksamkeit gerichtet ist, früher zum Bewufstsein komme als der gleichzeitige Schallreiz, auf den sich die Aufmerksamkeit nicht richtet. Und die Figur zeigt, wie die Folge hiervon werden mufs, dafs der Schall gleichzeitig mit einer Zeigerstellung aufgefafst wird, welche in der That später eintraf als das Schallsignal, oder mit anderen Worten: die Schallverschiebung mufs positiv werden, in der Umlaufsrichtung des Zeigers gehen. Eben dies geht aber aus den Versuchen hervor: bei visueller Aufmerksamkeit ist die Verschiebung positiv.

Ist die Aufmerksamkeit dagegen auf das erwartete Schall- (oder Berührungs-)signal gerichtet, so soll dieses der Theorie zufolge verhältnismäfsig schneller zum Bewufstsein kommen als die successiven Zeigerstellungen. Im zweiten Teil der Fig. 9 bezeichnet FG die

Zeigerstellungen; diese kommen, verhältnismäſsig spät, um die Zeitpunkte *HI* zum Bewuſstsein. Bei * trifft das Signal ein, auf welches die Aufmerksamkeit gerichtet ist; dasselbe kommt deshalb relativ früh, um den Zeitpunkt *K*, zum Bewuſstsein. Zugleich entsteht aber das Gesichtsbild der Zeigerstellung *M*, die faktisch stattfand, bevor das Schallsignal fiel. Dieses Signal wird also als mit einer thatsächlich vorhergehenden Zeigerstellung gleichzeitig aufgefaſst, oder mit anderen Worten: das Schallsignal hat sich in negativer Richtung verschoben. Eben dies zeigten auch die Versuche, und Theorie und Praxis befinden sich an diesem Punkte mithin in der schönsten Übereinstimmung.

Wenn, wie wir sahen, die Richtung der Verschiebung ausschlieſslich von der Richtung der Aufmerksamkeit abhängig ist, so wird wahrscheinlich auch die Gröſse der Verschiebung nur davon abhängig sein, ob die Aufmerksamkeit mehr oder weniger stark in bestimmter Richtung konzentriert ist. Dies eben hat Wundt nachgewiesen; wenn die Aufmerksamkeit nicht willkürlich in bestimmer Richtung gelenkt ist, wird die negative Zeitverschiebung bei wachsender Rotationsgeschwindigkeit immer kleiner, weil die schnellere Bewegung der Zeiger eine mehr visuelle Aufmerksamkeit erfordert. Bei konstantem Grade der Aufmerksamkeit sollte die Verschiebung dagegen konstant werden, von allen äuſseren Verhältnissen, besonders der Rotationszeit, unabhängig. Dies scheint auch der Fall zu sein. Natürlich wird die Verschiebung, in Graden des eingeteilten Kreises ausgedrückt, um so gröſser werden, je gröſser die Geschwindigkeit des Zeigers ist; durch die Zeitdauer ausgedrückt wird die Verschiebung indes annähernd eine konstante Gröſse. Der Kreis war, wie oben angegeben, in 60 Teile geteilt; findet man nun in einem gegebenen Falle, daſs die Verschiebung a Teile beträgt, während die Umlaufszeit des Zeigers t ist, so wird die Verschiebung, durch die Zeit ausgedrückt, also $at/60$ sein. Die Tab. 34 gibt eine Übersicht über die Verschiebung bei den im Vorhergehenden besprochenen Versuchen; um Brüche zu vermeiden, ist die Zeit hier in Tausendsteln Sekunden angegeben. In der Kolonne links ist die in Sekunden angegebene Umlaufszeit des Zeigers

angeführt. Übrigens zerfällt die Tabelle in drei Abschnitte, deren jeder einer der drei Versuchspersonen entspricht. Für eine derselben sind nur zwei kürzere Versuchsreihen mit bezw. visueller und auditiver Aufmerksamkeit angegeben; für die beiden anderen haben wir vier Reihen, nämlich teils mit visueller und auditiver, teils mit visueller und taktiler Aufmerksamkeit. Jede der angegebenen Zahlen ist die Mittelzahl von zehn selbständigen Versuchen mit Umstellung des Zeigers nach jedem einzelnen Versuche.

Tab. 34.

V-P	Vi.		Fnn.				G.			
t	vis.	aud.	vis.	aud.	vis.	takt.	vis.	aud.	vis.	takt.
10			+ 167	— 100	+ 133	— 117	+ 184	— 133	+ 467	— 200
5,9	+ 20	— 40	+ 108	— 59	+ 98	— 118	+ 157	— 118	+ 419	— 157
2,8	+ 18	— 40	+ 98	— 75	+ 61	— 89	+ 196	— 117	+ 327	— 173
1,7	+ 40	— 56	+ 82	— 60	+ 79	— 116	+ 119	— 145	+ 264	— 224
1,0	+ 40	— 50	+ 153	— 62	+ 133	— 120	+ 122	— 165	+ 220	— 277
M.	+ 29,5	— 46,5	+ 122	— 71	+ 101	— 112	+ 156	— 136	+ 339	— 206
M.V.	10,5	6,5	31	13	26	9	28	16	83	35

Aus der Tabelle geht nun erstens hervor, dafs die Verschiebung bei visueller Aufmerksamkeit positiv, in allen anderen Fällen aber negativ ist; dies wurde bereits im Vorhergehenden erörtert. Ferner sehen wir, dafs die Zahlen jeder einzelnen Kolonne bei verschiedener Rotationszeit aber konstanter Richtung der Aufmerksamkeit zwar nicht so wenig schwanken, jedoch durchaus keine Gesetzmäfsigkeit darbieten. Die Variation mufs deshalb gewifs von Schwankungen der Stärke der Aufmerksamkeit herrühren, und hierin liegt nichts Sonderbares, da es äufserst schwierig ist, die Aufmerksamkeit mit konstanter Stärke in einer gegebenen Richtung konzentriert zu halten, wenn man weifs, dafs in einer ganz anderen Richtung ein Reiz erwartet werden kann, den man ebenfalls auffassen soll. Der Mittelwert der Zahlen jeder einzelnen Kolonne darf deswegen als der genaueste Ausdruck für die Gröfse der Verschiebung betrachtet werden; diese Mittelwerte sind in der Reihe

M angegeben, und unter dieser, in der Reihe *MV*, ist die mittlere Variation, d. h. das Mittel der Abweichung der einzelnen Gröfsen vom mittleren Werte angeführt. Hier zeigt sich nun eine andere Gesetzmäfsigkeit, indem die mittlere Variation bei den mit visueller Aufmerksamkeit unternommenen Versuchen durchweg gröfser ist als bei den anderen Versuchen. Dies ist auch begreiflich, denn bei visueller Aufmerksamkeit findet sich die fortwährende Geneigtheit, die Aufmerksamkeit zum Teil auf das erwartete Signal zu richten; deshalb schwankt die Stärke der Aufmerksamkeit bedeutend, wozu sich dagegen keine Ursache findet, wenn die Aufmerksamkeit auf das Signal gerichtet sein soll, denn den Zeiger hat man stets vor Augen, dieser kann der Aufmerksamkeit nicht entgehen, selbst wenn letztere auf das Signal konzentriert ist. Folglich werden die mittleren Variationen im letzteren Falle kleiner als im ersteren.

Was die grofse Verschiedenheit der Zahlen betrifft, die sich hinsichtlich der drei Versuchspersonen zeigt, so darf dieselbe nicht als eine individuelle Verschiedenheit betrachtet werden, die ihren Grund in der gröfseren oder geringeren Geschwindigkeit der Vorgänge bei dem einzelnen Individuum fände. Die Verschiedenheit ist einfach eine Folge der Art und Weise, wie jede V-P bei den Beobachtungen mit vollem Bewufstsein verfuhr. Vi. bestrebte sich fortwährend, seine Aufmerksamkeit einigermafsen gleich unter die beiden Reize zu verteilen; G. ging zur entgegengesetzten Äufserlichkeit und konzentrierte sich mit voller Stärke auf einen derselben; Fnn. schlug eine passende Mittelstrafse ein. Offenbar ist es hiermit übereinstimmend, dafs Vi. für die Verschiebung kleine Werte erhielt, da der eine Reiz nicht auf Kosten des anderen sehr begünstigt wurde, während G. dagegen bis 10 mal so grofse Verschiebungen erhält, da die Aufmerksamkeit so stark nach einer einzigen Richtung konzentriert ist, dafs der andere Reiz sich nur mit Mühe den Weg zum Bewufstsein bahnt. Zwischen diesen beiden Äufserlichkeiten liegen die Zahlen für Fnn. In all diesem liegt aber nicht notwendigerweise etwas Individuelles; Vi. hätte ebenso grofse Zahlen wie G. erhalten können, wäre er auf dieselbe Weise

verfahren. Die Zahlen legen nur dar, dafs die Gröfse der Verschiebung durch den Grad der Aufmerksamkeit bestimmt ist. Wir können somit feststellen:

Bei der Auffassung gleichzeitiger Reizungen verschiedener Sinnesorgane findet der Erfahrung gemäfs zwischen den ausgelösten Empfindungen eine zeitliche Verschiebung statt. Es erweist sich, dafs die Richtung und die Gröfse dieser Verschiebung ausschliefslich durch die Richtung und die Stärke der Aufmerksamkeit bestimmt sind, indem der Reiz, auf den die Aufmerksamkeit gerichtet ist, zuerst zum Bewufstsein kommt und zwar um so früher, je mehr die Aufmerksamkeit auf denselben konzentriert wird. Diese Verhältnisse sind als natürliche Konsequenzen der oben dargestellten Theorie von der Aufmerksamkeit zu verstehen.

DIE DYNAMISCHEN VERHÄLTNISSE DER GEFÜHLE.

Lust und Unlust. Im Vorhergehenden berücksichtigten wir ausschliefslich solche psychischen Zustände und Thätigkeiten, die entweder ganz ohne Gefühlsbetonung sind, oder bei denen diese doch nur so wenig hervortritt, dafs man, ohne einen gröfseren Fehler zu begehen, von derselben abstrahieren kann. Wir schreiten nun zur Untersuchung der Energieverhältnisse bei den eigentlichen Gefühlen, den entschiedenen Zuständen der Lust oder Unlust. Hier müssen wir ganz gewifs darauf vorbereitet sein, höchst eigentümliche Erscheinungen anzutreffen. Denn Férés Untersuchungen zufolge sollten Unlustgefühle allerdings eine Verminderung der gleichzeitigen Muskelarbeit bewirken — was an und für sich nicht sonderbar wäre — Lustgefühle dagegen sollten eine Vermehrung der Muskelarbeit herbeiführen. Da diese Erscheinung in entschiedenem Widerspruche mit allem früher von uns Gefundenen steht, wird es gewifs

der Mühe wert sein, sie einer weit eingehenderen Untersuchung zu unterwerfen, weil eine genaue Feststellung der Bedingungen für eine derartige Vermehrung der Muskelkraft durch gleichzeitige psychische Zustände zweifelsohne neues Licht über die Natur der Gefühle verbreiten wird.

Alle die Schwierigkeiten, die stets mit der experimentellen Erzeugung von Lustgefühlen verbunden sind, und die ich im 1. Teile dieses Werkes S. 129 u. f. näher erörtert habe, treffen wir bei diesen Versuchen wieder an. Hierzu kommen aber noch mehrere andre, die durch die eigentümlichen Verhältnisse bedingt sind, unter welchen sich die V-P befindet. Sitzt jemand in einem Sessel, ohne sonst etwas zu thun zu haben, als nur, sich sowohl psychisch als physisch möglichst ruhig zu verhalten, so ist es jedenfalls nicht schwer, ihn zum Objekte verschiedener Reizungen zu machen. Man kann ihm ein Riechfläschchen unter die Nase halten, ihm wohl- oder übelschmeckende Stoffe löffelweise eingeben, ihn Bilder betrachten lassen u. s. f. Weit ungünstiger stellen sich die Verhältnisse dagegen, wenn die V-P am Ergographen arbeitet. Ihre Aufmerksamkeit wird schon vorher durch die gewaltige Muskelanspannung stark beansprucht, sie sitzt selten vollkommen ruhig, so dafs es oft schwierig ist, eine hinlänglich kräftige Reizung hervorzubringen, und in vielen Fällen wird der Reiz die Aufmerksamkeit in so hohem Grade von der Muskelarbeit ablenken, dafs die Änderung des Ergogramms durchaus nicht als Ausdruck des hervorgerufenen Gefühlszustandes betrachtet werden kann. Nur durch Geruchsreize war ich im stande, diesen verschiedenen Schwierigkeiten zu entgehen, indem der Stoff mittels einer Spray in einem kräftigen Strahl an dem Gesichte der V-P vorbei gesandt wurde. Da die Atmung wegen der Muskelarbeit stets ein wenig beschleunigt war, wurde die V-P hierdurch gezwungen, den Stoff in reichlicher Menge einzuatmen, ohne dafs dies ihr besondere Anstrengung kostete oder die Aufmerksamkeit beanspruchte. Auf diese Weise gelang es meistens, ein den Umständen nach recht kräftiges Lustgefühl hervorzurufen, dennoch war das Ergebnis der Versuche aber durchweg negativ. Nur ausnahmsweise war es möglich,

die von Féré gefundene Vermehrung der Muskelarbeit festzustellen. Wir gehen nun erst eine Reihe von Versuchen im einzelnen durch und untersuchen darauf, was diese Abweichung von Férés Resultaten verursachen kann.

Pl. XXIX, A. d. 22/2. Dr. B. Lavendelöl. Takt 40 pr. Min.

Die Reizung fand zwischen den beiden Pfeilen statt, und es erscheinen hier ein paar kleine Senkungen, welche andeuten, daſs die Aufmerksamkeit der Muskelarbeit entzogen wurde, eine Vermehrung der letzteren ist jedoch nicht zu spüren, weder während der Reizung, noch nach derselben. Die Kurve ist übrigens völlig typisch; ich besitze eine Reihe ähnlicher, von verschiedenen Versuchspersonen ausgeführter Kurven, die sich alle durch ein ebenso negatives Resultat auszeichnen. Das Verhältnis ist hier offenbar ganz das nämliche, das wir oben hinsichtlich nicht-gefühlsbetonter sinnlicher Wahrnehmungen fanden; diese zeigten ebenfalls keinen meſsbaren Einfluſs auf die gleichzeitige Muskelarbeit. Indes äuſserte eine meiner Versuchspersonen einst, der Grund des negativen Resultates liege wahrscheinlich darin, daſs die V-P die Reizung nicht in guter Ruhe genieſsen könne; führe man dagegen das Ergogramm bei langsamerem Takte aus, so könne das Ergebnis möglicherweise ein anderes werden. Dies verdiente wenigstens einen Versuch, und es wurden deshalb eine Reihe Ergogramme im Takte 12 pr. Min. ausgeführt, was der V-P etwa 4 Sek. lang völlige Ruhe zwischen den einzelnen Partialarbeiten gewährte. Irgend eine wesentliche Verbesserung scheint diese Veränderung doch nicht herbeigeführt zu haben, wie aus den folgenden Kurven hervorgeht.

Pl. *XXIX, B.* d. 12/3. Dr. B. Menthol. Takt 12 pr. Min.

Pl. XXIX, C. d. 29/3. Fnn. Menthol. Takt 12 pr. Min.

Keines dieser Ergogramme zeigt entschiedene Wirkung des Lustgefühls, obgleich dieses nach Angabe beider Versuchspersonen sehr deutlich war; die Einatmung der Pfeffermünzessenz wirkte höchst erfrischend und ermunternd. In der letzteren der beiden Kurven wurde die Reizung wiederholt, was die V-P ein wenig

beunruhigte, da sie nicht wufste, was die Absicht war; diese Unruhe verrät sich durch die unmittelbar nachfolgende Senkung, die sich später verliert. Ein positives Resultat der lusterregenden Reizung wird sich in diesen Ergogrammen aber wohl schwerlich nachweisen lassen. Nur in einem einzigen Falle erhielt ich entschiedene Vermehrung der Muskelarbeit unter diesen Verhältnissen. Das Ergogramm ist wiedergegeben:

Pl. XXIX, D. d. $^{31}/_{3}$. A. L. Menthol. Takt 12 pr. Min.

Hier findet sich, wie man sieht, eine unbestreitbare Steigerung, die kurz nach dem Anfange der Reizung beginnt und bis lange nach dessen Abschlusse andauert. Die Ursache dieses Resultates ist möglicherweise die, dafs die V-P von der Arbeit des Tages etwas ermüdet war, weshalb der erheiternde Einflufs der Pfeffermünze sich mit besonderer Stärke geltend machte. Rein individuell war diese Erscheinung jedenfalls nicht, denn bei der Wiederholung desselben Versuches an einem anderen Tage wurde das Resultat ebenso negativ wie hinsichtlich der anderen Versuchspersonen. Damit ein lusterregender Reiz überhaupt auf das Ergogramm influiere, scheint die Bedingung also erfüllt werden zu müssen, dafs das Lustgefühl recht bedeutende Stärke erhält; in diesem Falle bewirkt dasselbe eine merkliche Vermehrung der Muskelarbeit[1].

Trotz des äufserst geringen positiven Erfolgs dieser Versuche ziehe ich dennoch nicht in Zweifel, dafs Férés Wahrnehmung richtig ist, und dafs das erwähnte Ergogramm, Pl. XXIX, D, demgemäfs erklärt werden mufs. Aus dem täglichen Leben ist es ja eine bekannte Sache, dafs starke Lustgefühle wirklich die Innervation der willkürlichen Muskeln verstärken. Man sieht dies an den Kindern, die vor Freuden tanzen und in die Hände

---

[1] Es mufs übrigens möglich sein, eine Vermehrung der Muskelarbeit auch bei schwächeren Lustgefühlen nachzuweisen. Wenn man nämlich statt mit der ganzen Hand nur mit einem einzelnen Finger arbeitet (wozu mein Ergograph sich leicht einrichten läfst), so mufs die zur Innervation erforderliche Energie geringer sein, und folglich mufs ein durch Bahnung aus einem Lustgefühl hervorgerufener Zuwachs in der ausgeführten Arbeit zu spüren sein. Leider fiel mir dieser Ausweg erst so spät sein, dafs es mir nicht möglich war, denselben zu prüfen.

klatschen. Und jeder Turner weiſs aus Erfahrung, welchen Einfluſs Musik, Zuschauer und überhaupt eine festliche Stimmung auf seine Leistungen haben können; unter solchen Verhältnissen springt man leicht ein paar Centimeter höher als gewöhnlich. Die Thatsache selbst, daſs Lustgefühle die gleichzeitig ausgeführte Muskelarbeit vermehren, scheint also unbestreitbar zu sein. Es wird daher nur die Frage, weshalb Féré derartige Versuche in so groſsem Umfange gelangen, während die meinigen nur ausnahmsweise ein unzweifelhaftes Resultat gaben. Viele Aufschlüsse gibt Féré freilich nicht über die Verhältnisse, unter denen seine Versuche angestellt wurden, an diesem Punkte läſst er uns aber doch nicht im Stiche. Soweit ich zu sehen vermochte, geht nämlich aus seinem Werke hervor, daſs nur ein einziger dieser Versuche mit einem normalen Menschen angestellt wurde[1], alle anderen wurden an Hysterikern unternommen. Dies macht die Sache verständlich, denn Hysteriker sind nicht nur für alle lusterregenden Reizungen höchst empfänglich, sondern auch sehr suggestibel. Dieser Umstand erklärt, daſs die Vermehrung der Muskelkraft bei Férés Versuchen nicht nur die starken Gefühle begleitet, sondern auch als Folge solcher Sinnesreize zum Vorschein kommt, die bei normalen Menschen nur schwach betonte Empfindungen hervorrufen, z. B. einzelne Töne und Farben. Die Regelmäſsigkeit, mit welcher bestimmte Töne und Farben auf Férés Versuchspersonen wirken, und die enorme Zunahme der Muskelkraft, die durch diese Reize verursacht wird[2], würden ganz unverständlich sein, wenn man nicht wüſste, daſs es sich hier um Hysteriker handelt, die wahrscheinlich unter dem Einflusse kräftiger Suggestionen standen. Hierdurch verlieren die Versuche allerdings an überzeugender Kraft, anderseits gelangen wir aber zum Verständnisse, weshalb etwas Derartiges sich mit normalen Individuen nicht nachmachen läſst. Als Resultat dieser verschiedenen Erfahrungen können wir nun folgendes behaupten:

---

[1] Sensation et mouvement. S. 63.

[2] Ibid. S. 33—50.

Bei normalen Menschen werden einfache, lustbetonte Empfindungen nur ausnahmsweise, nämlich wenn das Gefühl wegen besonderer Verhältnisse ungemein stark wird, einen nachweisbaren Einfluſs auf die gleichzeitige Muskelarbeit üben. Wird ein Lustgefühl irgend einer Art aber so stark, daſs es auf die Muskelarbeit influiert, so scheint es der Erfahrung nach deren Zunahme zu bewirken.

Bevor wir zur Untersuchung schreiten, wie diese eigentümliche Wirkung zu stande kommt, wird es zweckmäſsig sein, vorerst die entsprechenden Verhältnisse der Unlustgefühle zu erörtern, weil man bei einer Erklärung der Wirkungen des Gefühls natürlich beide Gefühlsarten zugleich berücksichtigen muſs. Was den Einfluſs der Unlustgefühle auf die Muskelarbeit betrifft, so bietet es keine Schwierigkeit dar, denselben zu konstatieren. Erstens ist es ja viel leichter, starke Unlustgefühle experimentell zu erzeugen, und ferner scheinen die Verhältnisse überhaupt mehr ausgeprägt zu sein. Zu den Reizungen benutzte ich teils Geschmacksstoffe (doch nur in geringem Umfang, weil deren Applikation auf die Muskelarbeit störend einwirkte), und teils hohe Temperatur, indem eine kleine Kolbe mit heiſsem Wasser an dem entblöſsten rechten Arm angebracht wurde, während der linke Arm am Ergographen arbeitete. Die Versuche ergeben die völlige Bestätigung von Férés Resultaten. Schon ein unangenehmer Geschmacksreiz genügt, um eine deutliche Arbeitsverminderung zu bewirken; dies geht z. B. hervor aus:

Pl. XXIX, E. d. 3/3. A. L. Ein Theelöffel voll 10%-haltiger Chininauflösung.

Beim Pfeile wurde der Stoff eingegeben. Die sogleich eintretende kleine Senkung rührt wahrscheinlich nur von der durch die Annahme des Stoffes verursachten Störung her, nach drei gröſseren Partialarbeiten erblickt man aber eine sehr entschiedene Senkung. Da der Geschmack, wie es so oft geht, plötzlich aufhörte, stieg die Kurve sogleich, um wieder zu sinken, als der unangenehme Geschmack von neuem eintrat. Sehr häufig wurde diese Erscheinung konstatiert, daſs das

Aufhören der unangenehmen oder schmerzlichen Empfindung sofort ein Steigen des Ergogramms bewirkte, das aufs neue sank, wenn die Empfindung sich wieder einstellte. Besonders der Schmerz bei Hitze zeichnet sich durch seinen periodischen Charakter, sein Aufflammen und plötzliches Erlöschen aus, so dafs das Ergogramm bei derartigen Versuchen fast immer Schwankungen zeigt, die mit den Variationen der Empfindung gleichzeitig sind. Dies tritt hübsch hervor:

Pl. XXIX, F. d. 22/2. Dr. B. Wasser 84° C. am rechten Arm.

Die Senkung ist hier eine so entschiedene, dafs man ohne Schwierigkeit die Arbeitsverminderung zu berechnen vermag. Zu diesem Zwecke zeichnete ich auf gewöhnliche Weise den wahrscheinlichen Verlauf des Ergogrammes ein, wonach ich die verschiedenen Gröfsen berechnete. Man findet:

$$A_s = 57{,}5 \qquad A_r = 51{,}2 \qquad A_s - A_r = 6{,}3 \qquad M = 0{,}11.$$

Es ist also kein ganz verschwindender Bruchteil der disponibeln Energie, der zur Erzeugung der schmerzhaften Hitzeempfindung verbraucht wird. Natürlich wird dieser Energieverbrauch ganz von der Stärke des Gefühls abhängig sein. Dies geht aus den beiden folgenden Kurven hervor:

Pl. XXX, A. d. 22/2. A. L. Wasser 76° C. am rechten Arm, kaum schmerzhaft.

Pl. XXX, B. d. 22/2. A. L. Wasser 84° C. am rechten Arm; schmerzhaft.

Im ersteren Falle dauerte die Reizung ziemlich lange, weil das heifse Wasser der Verabredung gemäfs erst entfernt wurde, wenn die V-P klagte. Trotz der langen Dauer der Reizung war der Schmerz doch nur ein geringer, und demgemäfs zeigt das Ergogramm auch keine entschiedene Senkung. In der Kurve B dagegen, wo das Wasser so heifs war, dafs es fast augenblicklich wieder entfernt werden mufste, sehen wir zwei stark markierte Senkungen. Es wurde hier konstatiert, dafs der Schmerz während des Zwischenraums, der die Senkungen trennt, verschwunden war. Das periodische Aufflammen des Schmerzes ist bei diesen Versuchen fast

die Regel; als eine Ausnahme ist der folgende Fall zu betrachten:

Pl. XXX, C. d. 8/3. Fnn. Wasser 84° C. am rechten Arm.

Hier ist nur eine einzige Senkung, die bei fast konstanter Höhe der Partialarbeiten andauert, bis der Schmerz sich verloren hat. Der Schlufs des Ergogramms bildet offenbar die natürliche Fortsetzung von dessen Anfange. Übrigens war der Schmerz, den dieser Versuch der betreffenden V-P verursachte, ein ganz ernstlicher; jedenfalls wünschte die V-P keine Wiederholung. Als ich nach einiger Zeit den Versuch nichtsdestoweniger wiederholte, erhielt ich folgendes, interessantes Resultat:

Pl. XXX, D. d. 10/4. Fnn. Wasser 84° C. am rechten Arm.

Das Ergogramm als Totalität ist ganz abnorm. Es beginnt mit einer längeren Reihe verhältnismäfsig kleiner Partialarbeiten von konstanter Gröfse, und ein wenig vor dem Eintreten der Reizung findet ein starkes Sinken statt. Die Kurve erschien mir so merkwürdig, dafs ich die V-P ausfragte, was denn los gewesen sei. Sie gestand, dafs sie gleich von Anfang des Versuches an eine nicht unbedeutende Angst gefühlt habe, und dieses Gefühl sei in dem Augenblicke, da ich mich mit dem heifsen Wasser nahte, also kurz vor der Applikation des Reizes, stark hervortretend geworden. Der Versuch ist daher ganz interessant, weil er deutlich zeigt, dafs ein Unlustaffekt wie die Furcht lähmende Wirkung auf die willkürlichen Muskeln übt. Dies wufste man freilich schon vorher, die experimentelle Bestätigung der Sache kann aber doch nichts schaden. Das Ergebnis dieser Versuche wird also:

Einfache unangenehme und schmerzhafte Empfindungen, wie auch Unlustaffekte (Furcht) bewirken eine Verminderung der gleichzeitigen Muskelarbeit, die um so beträchtlicher wird, je stärker das Gefühl ist.

Wir sehen also, dafs Unlustgefühle, Schmerz u. dgl. eine mefsbare Arbeitsverminderung bewirken, deren Gröfse von der Stärke des Gefühls abhängig ist. An der relativen Arbeitsverminderung haben wir folglich

ein Mafs für die Stärke des Gefühls, indem die relative Arbeitsverminderung M hier ebenso wie bei den intellektuellen Erscheinungen denjenigen Bruchteil der freien Energie des Gehirns angeben mufs, der zur Erzeugung des psychischen Zustandes verbraucht wird. Hierdurch sind wir so weit gelangt, dafs wir eine Thatsache zu erklären vermögen, die im Vorhergehenden dargestellt wurde, deren erschöpfende Behandlung wir aber vorläufig aufschieben mufsten. Wir meinen hiermit den eigentümlichen Verlauf der begrenzten Ergogramme. Für die unbegrenzten Ergogramme und den ersten Teil der begrenzten fanden wir nämlich folgenden Ausdruck für die Gröfse der Arbeit:

$$A = q + c_2 \log.(R + y) + q_2 \log.\left[q_1 - \log.(R + y)\right] \quad \text{(Gl. 51)}.$$

Es zeigt sich indes, dafs diese Formel von dem Augenblicke an, da die Muskelermüdung schmerzhaft zu werden anfängt, nicht mehr gültig ist; man erhält dann folgenden Ausdruck:

$$A_1 = q + c_2 \log.(R + y) + q_2 \log.\left[q_1 - \log.(R + y)\right] - q_3(R - q_4) \quad \text{(Gleich. 52)}.$$

Die Formel zeigt, dafs von dem Eintritt des Müdigkeitsschmerzes an eine Kraft wirkt, welche den Arbeitszuwachs vermindert, und eben dieser Umstand bewirkt, dafs die Ergogramme begrenzt werden, indem die Partialarbeiten gegen Null konvergieren. Oben (S. 143 u. 170) konnten wir uns nicht darauf einlassen, die Ursache dieser Erscheinung zu untersuchen; auf unserem gegenwärtigen Standpunkte scheint die Sache dagegen durchaus keine Schwierigkeit darzubieten. Denn wenn jede Unlust einen Energieverbrauch verursacht, der sich durch eine Verminderung der gleichzeitigen Muskelarbeit kundgibt, so mufs dies zweifelsohne auch für den von der Muskelermüdung herrührenden Schmerz gelten. Oder mit anderen Worten: wenn die Muskelermüdung einen gewissen Grad erreicht, wird der hierdurch ausgelöste zentrale Prozefs einen so grofsen Energieverbrauch erfordern, dafs dieser die zentrale Innervation des Muskels direkt hemmt und sich folglich durch eine Verminderung der geleisteten Arbeit äufsert. Es ist daher ganz natürlich, dafs die Arbeit nicht nach dem-

selben Gesetze weiter anwachsen kann, das gültig ist, solange keine Hemmung der Innervation stattfindet. Gehen wir nun von der Richtigkeit dieser Erklärung aus, so können wir aus Gleich. 52 einen Ausdruck dafür ableiten, wie der Schmerz zunimmt, wenn die Arbeit fortgesetzt wird.

Da A und A_1 in Gleich. 51, bezw. 52 die gesamte in R Partialarbeiten geleistete Arbeitsmenge ausdrückt, können wir leicht die Gröſse der R^{ten} Partialarbeit finden. Diese sei P_R unter der Voraussetzung, daſs sich kein Müdigkeitsschmerz geltend gemacht hat. Man findet nun P_R, indem man die in $R-1$ Partialarbeiten gelieferte Arbeit von der in R Partialarbeiten geleisteten Arbeit abzieht; die Differenz muſs gerade die Gröſse der R^{ten} Partialarbeit werden. Setzt man daher in Gleich. 51 $R-1$ statt R, und zieht man den somit entstandenen Ausdruck von Gleich. 51 ab, so erhält man:

$$P_R = c_2 \log. \frac{R+y}{R-1+y} + q_2 \cdot \log. \frac{q_1 - \log.(R+y)}{q_1 - \log.(R-1+y)}$$

Hat dagegen ein die Muskelarbeit hemmender Müdigkeitsschmerz gewirkt, so wird die R^{te} Partialarbeit die Gröſse p_R erhalten, und diese bekommt man aus Gleich. 52 auf dieselbe Weise, wie P_R aus Gleich. 51 abgeleitet wurde. Also:

$$p_R = c_2 \log. \frac{R+y}{R-1+y} + q_2 \log. \frac{q_1 - \log.(R+y)}{q_1 - \log.(R-1+y)} - q_3 = P_R - q_3.$$

Hieraus folgt:

$$P_R - p_R = q_3 \quad . \; . \; . \; . \; . \quad \text{(Gleich. 60).}$$

In Worten ausgedrückt sagt Gleich. 60, daſs die durch den Müdigkeitsschmerz hervorgerufene Verminderung der Gröſse der einzelnen Partialarbeiten eine Konstante ist. Nun ist $P_R - p_R$ die absolute Arbeitsverminderung, die der Schmerz hervorgebracht hat; die relative Arbeitsverminderung, die das Maſs für die Stärke S des Schmerzes ist, erhält man hieraus durch Division mit P_R, also:

$$\frac{P_R - p_R}{P_R} = S = \frac{q_3}{P_R}.$$

Oder mit anderen Worten: der Müdigkeitsschmerz ist umgekehrt proportional zur Gröſse der Partialarbeiten.

Dieses Resultat, das mithin eine einfache mathematische Konsequenz der Gleich. 52 ist, stimmt mit der Erfahrung völlig überein. Setzt man die Muskelarbeit bis über den Punkt hinaus fort, wo die Ermüdung schmerzhaft wird, so wird der Schmerz fortwährend an Stärke zunehmen[1]. Die Selbstbeobachtung kann natürlich keine gesetzmäfsige Zunahme des psychischen Phänomens feststellen, sie gibt uns jedoch auch keinen Anlafs, die Richtigkeit des gefundenen Ausdrucks zu bezweifeln. Da dieser also als mit der Erfahrung übereinstimmend zu betrachten ist, spricht diese Konsequenz für die Richtigkeit der Erklärung, die oben von der Ursache der begrenzten Ergogramme gegeben wurde. Wir stellen daher fest:

Wenn die Ermüdung durch Muskelarbeit schmerzhaft wird, so wird dieser Schmerz, wie jede andere starke Unlust, eine Hemmung der Muskelarbeit bewirken; dies ist die Ursache, weshalb begrenzte Ergogramme entstehen. Der fortwährend zunehmende Schmerz wird nämlich zur Folge haben, dafs jede einzelne Partialarbeit um eine konstante Gröfse vermindert wird, weshalb die Partialarbeiten nach Null konvergieren.

Kraepelins Vermutung, dafs das Aufhören einer Muskelarbeit von einer zentralen Hemmung herrühre (vgl. S. 143), hat hierdurch also ihre völlige Bestätigung gefunden, und wir haben nicht nur diese Hemmung nachgewiesen, sondern wir wissen auch, wodurch sie entsteht, und welchem Gesetze gemäfs sie anwächst. Überdies sehen wir, dafs diese Hemmung gar keine alleinstehende Erscheinung ist, sondern nur ein spezieller Fall des hemmenden Einflusses der Unlustgefühle auf gleichzeitige Muskelarbeit.

Die dynamische Gefühlstheorie. Nachdem wir nun über die eigentümlichen Energieverhältnisse ins reine

[1] Ich sehe hier von der unbestreitbaren Thatsache ab, die den meisten wohl aus dem täglichen Leben bekannt ist, dafs die Fortsetzung der Arbeit unter gewissen Verhältnissen die Überwindung der Müdigkeit bewirken kann. Die Erscheinung wurde oben (S. 141) berührt, mufs aber zum Gegenstand besonderer Untersuchungen gemacht werden.

gekommen sind, an welche die Entstehung der Gefühle sich der Erfahrung gemäfs als gebunden erweist, wird es natürlich zu untersuchen sein, in welchem Umfang diese Thatsachen zu unserem Verständnisse der Natur der Gefühle beitragen. Eine solche Untersuchung kann nicht wohl unterbleiben, da viele Psychologen gerade in der Lust und Unlust die psychische Äufserung des Verhältnisses zwischen der Leistungsfähigkeit des Zentralorgans und dem von einem gegebenen psychischen Zustand erforderten Energieverbrauch erblicken [1]. Für eine derartige Theorie werden die hier hervorgezogenen Thatsachen augenscheinlich entweder in positiver oder negativer Richtung von nicht geringer Bedeutung sein. Wir können nun auch nicht umhin, auf solche theoretischen Betrachtungen zu geraten, sobald wir die Frage stellen, wie man sich denn zu denken hat, dafs die Vermehrung der Muskelarbeit, welche die Lustgefühle begleitet, zu stande kommt.

Um diese merkwürdige Erscheinung zu erklären, sind zwei verschiedene Hypothesen aufgestellt worden. Die eine ist die schon in der Einleitung erwähnte Féré-sche: »les excitations périphériques déterminent une augmentation de l'énergie disponible, de la force utilisable«. Wie ich dort bemerkte, ist es durchaus nicht klar, was Féré mit diesen Worten meint; es ist nicht einmal zu ersehen, ob man sich zu denken habe, dafs die Energie der Muskeln oder die freie Energie des Gehirns zunehme. Es scheint sich nicht der Mühe zu lohnen, eine so verschwimmende Hypothese näher zu untersuchen; findet man sie unhaltbar in dieser oder jener Form, so wird der Urheber ja stets einwenden können, er habe sich die Sache auf ganz andere Weise gedacht. Unter allen den vielen möglichen Hypothesen, die sich unter Férés Worten verbergen, werde ich nur eine einzige hervorziehen, die mir doch einigen Sinn zu geben scheint, nämlich: dafs die freie Energie des Gehirns zunehme. Dies ist keineswegs undenklich. Ein wie grofser Teil der Totalenergie einer Kraftmaschine sich frei umsetzen läfst, hängt von verschiedenen Umständen ab und variiert deshalb mit diesen. So ist die

[1] Die Hauptgesetze des menschlichen Gefühlslebens. S. 153 u. f.

freie Energie einer Dampfmaschine keineswegs mit der Totalenergie gegeben, mit der Temperatur des Dampfes; sie ist in hohem Grade von dem Fallen der Temperatur abhängig; eine Veränderung der Temperatur des Kondensators wird daher auch das Verhältnis der freien Energie zur Totalenergie ändern. Bei den galvanischen Elementen ist dieses Verhältnis ebenfalls Schwankungen unterworfen, indem es sowohl kleiner als auch gleich mit und gröſser als 1 sein kann; übrigens ist es durch die Beschaffenheit der wirkenden chemischen Stoffe bedingt, weshalb man es zu beherrschen vermag. Hiermit in Analogie könnte man sich auch denken, daſs die freie Energie des Gehirns variierte, und da wir die Energie im Gehirn unter chemischer Form gegeben haben, müſste eine Veränderung des Verhältnisses zwischen der freien Energie und der Totalenergie auf der Beschaffenheit der Stoffe beruhen. Eine Veränderung in dieser Richtung scheint aber eine Änderung der Ernährungsthätigkeit vorauszusetzen, die also die primäre Wirkung des äuſseren Reizes würde. Diese Hypothese würde mithin zu der Annahme führen, daſs die primären Wirkungen Störungen des Blutumlaufs wären, die dann wieder so auf das Gehirn influierten, daſs eine vermehrte Innervation der willkürlichen Muskeln möglich würde.

So könnte sich die Sache freilich verhalten, es gibt aber, meines Wissens, nichts, das dafür spricht, daſs nur die Änderungen des Blutumlaufs primäre Wirkungen des lusterregenden Reizes sein sollten. Bekanntlich hat Lange auch angenommen, daſs die Freude nicht nur eine Erweiterung der Blutgefäſse, sondern auch eine Steigerung der Funktion des willkürlichen Bewegungsapparates primär herbeiführe[1]. Was auf diese Weise von dem Affekt der Freude angegeben wird, wird sich mit Recht aber auch so erweitern lassen, daſs es von den mehr normalen Lustgefühlen gilt, da diese Zustände sich wohl einzig und allein durch den Grad der Stärke voneinander unterscheiden. Es fällt nun auch nicht schwer, den Nachweis zu liefern, daſs die psychophysiologischen Prozesse, an welche die Entstehung der Lust-

[1] Über Gemütsbewegungen. S. 19.

gefühle gebunden ist, solcher Art sind, dafs sie als andere Prozesse anbahnend wirken müssen. Denn sowohl die Versuche als die tägliche Erfahrung zeigt, dafs während der Lustgefühle jedenfalls keine Verminderung der Muskelarbeit stattfindet. Dies lehrt uns, dafs der Energieverbrauch des arbeitenden Zentrums nur ein geringer sein kann, wenn ein Lustgefühl entsteht, denn jeder gröfsere Energieverbrauch mufs, wie wir oben sahen, notwendigerweise auf andere gleichzeitige Vorgänge hemmend wirken, mithin eine Verminderung der Muskelarbeit erzeugen. Ein kleinerer Energieverbrauch an einem einzelnen Punkte wirkt aber gewöhnlich bahnend, indem die Bewegung sich nach anderen Stellen verbreitet, ohne einen andauernden Energiezuflufs nach dem Ausgangspunkte hervorzurufen. Wenn eine derartige bahnende Bewegung sich zu den willkürlichen Bewegungstendenzen addiert, wird die Folge natürlich werden, dafs die Muskelinnervation zunimmt, und dies zeigt sich im Ergogramm als eine Vermehrung der Arbeit, im täglichen Leben als raschere und lebhaftere Bewegungen. Wird die Bahnung in den verschiedenen motorischen Zentren während einer Gemütsbewegung besonders stark, so werden leicht Bewegungen ausgelöst, die ohne diese Bahnung nicht zu stande kommen würden; deshalb werden Singen, Pfeifen, Tanzen und viel überflüssiges Reden die fast unvermeidlichen vernehmlichen Äufserungen eines solchen Affekts.

Die Zunahme der gleichzeitigen Muskelarbeit, die ein einigermafsen starkes Lustgefühl begleitet, ist also leicht als durch eine Bahnung verursacht zu verstehen, die wiederum dadurch bedingt ist, dafs der psychophysiologische Vorgang, an den das Gefühl gebunden ist, nur einen geringen Energieverbrauch erfordert. Dies stimmt auch damit überein, dafs es gewöhnlich die schwächeren Sinnesreize sind, die lustbetonte Empfindungen hervorrufen; ein zu starker Reiz wird einen gröfseren Energieverbrauch bewirken, der Unlust und Hemmung der Muskelarbeit zur Folge hat. Jedoch braucht dies nicht immer stattzufinden; ist die Reizung nur sehr kurz, so kann sie sehr wohl bedeutende Stärke erreichen, ohne darum eine Verminderung der Muskelarbeit herbeizuführen. In physio-

logischer Beziehung liegt hierin nichts Sonderbares. Der starke, aber kurzdauernde Reiz wird im empfangenden Zentrum allerdings ein bedeutendes Fallen des Potenzials hervorrufen, wenn der Reiz aber sogleich aufhört, kann kein andauernder Energiestrom nach dem Zentrum entstehen. Die Bewegung verbreitet sich also nur und nimmt somit ein Ende; zunächst müſste sie dann bahnend wirken. Die Versuche bestätigen dies. Jeder starke, aber hinlänglich kurze Reiz, dessen psychische Wirkung zunächst als Erschrecken zu bezeichnen ist, bewirkt Vermehrung der Arbeit. Als Beispiel führe ich an:

Pl. XXX, E. d. 22/2. Dr. B. Erschrecken bei einem Schuſs.

Der Chok war ziemlich bedeutend, da die V-P vorher gar keine Ahnung hatte, daſs mit ihr experimentiert werden sollte. Der Pfeil gibt den Augenblick an, da der Schuſs fiel, und die Kurve zeigt, daſs nicht nur die einzelne, mit dem Reize gleichzeitige Muskelkontraktion hierdurch verstärkt wurde, sondern daſs auch in den beiden nächstfolgenden Partialarbeiten die Wirkung noch deutlich zu spüren war[1]. Besonders interessant ist dies, weil es zeigt, daſs das Lustgefühl und die Arbeitsvermehrung nicht untrennbar sind. Normal gehen sie allerdings zusammen, man kann aber auch bei Unlustgefühlen, nämlich beim Erschrecken, Arbeitsvermehrung haben. Hier findet offenbar ein tieferer Zusammenhang statt, denn, wie wir wissen, ist das Erschrecken auch die einzige Unlust, die eine Pulsverlängerung hervorruft, welche sonst die Lustgefühle charakterisiert (vgl. I. Teil. S. 73). Dieselbe Ursache, die in den motorischen Zentren eine Bahnung bewirkt, scheint also ebenfalls eine Erregung des Nervus vagus zu erzeugen, und diese Verbindung scheint konstant,

[1] Die Bahnung bewirkt also hier noch 4 Sek. nach dem Eintreffen des Reizes eine meſsbare Zunahme der Muskelarbeit. Wenn dies thatsächlich vorkommen kann, liegt wohl kaum etwas Unwahrscheinliches in der Annahme, daſs die Bahnung bis 6 Sek. lang die Verstärkung einer nachfolgenden Empfindung bewirken wird, selbst wenn der Reiz auch ein bedeutend schwächerer ist als der im besprochenen Versuche angewandte. Durch diese Annahme läſst sich die bei Schallempfindungen vorkommende Periodizität des Zeitfehlers erklären (vgl. S. 117).

von dem psychischen Zustand unabhängig zu sein, der von diesen Äufserungen begleitet wird. Für das Verständnis, welche Bedeutung die körperlichen Äufserungen psychischer Zustände für den Organismus als Totalität haben, wird dieser Zusammenhang offenbar ziemlich wesentlich sein; wenn wir in einem folgenden Teile zur Untersuchung dieser Verhältnisse gelangen, müssen wir diese eigentümliche Verbindung deshalb besonders berücksichtigen. Hier, wo wir nur mit den Bedingungen für das Entstehen gewisser psychischer Erscheinungen zu schaffen haben, können wir uns nicht näher darauf einlassen.

Betrachten wir jetzt die Unlustgefühle, so hinterlassen die Versuche uns keinen Zweifel, dafs die Unlust gewöhnlich an psychophysiologische Prozesse gebunden ist, welche einen bedeutenden Energieverbrauch erfordern. Indes ist ein grofser Energieverbrauch keine notwendige und genügende Bedingung für das Entstehen von Unlust. Denn einerseits wissen wir, dafs verschiedene psychische Thätigkeiten, wie das Denken, Auswendiglernen u. s. w., weit gröfseren Energieverbrauch erfordern können, ohne dafs der Zustand deshalb unlustbetont würde. Anderseits sahen wir, dafs wenigstens ein einzelnes Unlustgefühl, das Erschrecken, nur geringen Energieumsatz bewirkt. Es leuchtet daher ein, dafs ein gröfserer Energieverbrauch an und für sich nicht notwendigerweise unlustbetonte psychische Zustände erzeugt, und es entsteht nun die Frage, welche ferneren Bedingungen erfüllt sein müssen, damit die Unlustbetonung eintrete. Die Beantwortung dieser Frage stellt sich fast von selbst ein, wenn wir die Verschiedenheit derjenigen psychischen Erscheinungen untersuchen, welche, wie die Erfahrung zeigt, bedeutenden Energieverbrauch beanspruchen. Bei der psychischen Arbeit operiert man stets mit einer gröfseren Anzahl von Vorstellungen; es entstehen zahlreiche Associationen, deren einige festgehalten, andere verdrängt werden, und das ganze Gewühl sich kreuzender Vorstellungen und Urteile durchzieht stets, wie der leitende Faden im Labyrinth, die Vorstellung von dem zu erreichenden Zweck. Ein solcher Reichtum an wechselnden psychischen Zuständen erfordert unzweifel-

haft die Arbeit einer sehr grofsen Anzahl von Neuronen, deren jedes für sich einen geringen Teil der umgesetzten Energie liefert. Ganz anders scheint sich die Sache dagegen zu stellen, wenn wir mit unlustbetonten Zuständen zu thun haben. Wir sahen, wie ein einzelner Sinnesreiz, die erhöhte Temperatur an einem stark begrenzten Teile der Oberfläche des Körpers, denselben Energieverbrauch bewirken kann wie eine ziemlich umfassende psychische Arbeit. Nur wird ein derartiger einfacher Sinnesreiz, der nur eine Empfindung von Hitze hervorruft, aller Wahrscheinlichkeit nach unmittelbar nur eine geringe Anzahl Neuronen in Thätigkeit setzen, und wenn nichtsdestoweniger ein ziemlich bedeutender Energieverbrauch stattfinden soll, mufs jedes einzelne Neuron daher einen sehr grofsen Teil dieser Energie liefern. Hier treffen wir folglich einen Unterschied an, der, wenn er auch rein quantitativ ist, für den Organismus als Totalität doch eine bedeutende Rolle spielen mufs. Soll ich eine Last von 50 Kilo heben, wird dies keine nachteiligen Folgen haben, wenn ich mit beiden Händen anpacken und alle Muskeln des Körpers anspannen kann; übt dasselbe Gewicht aber seine Wirkung auf einen einzelnen Finger, so wird dies wahrscheinlich eine Verstümmelung nach sich ziehen. Ebenso mit dem Gehirn. Wird ein Energieverbrauch über eine gröfsere Anzahl Neuronen verteilt, so ist dies eine Arbeit, die ohne Schwierigkeit geleistet werden kann und keine besonderen Folgen erhält; soll dieselbe Arbeit aber von einer stark begrenzten Anzahl Neuronen geleistet werden, so werden diese aufs äufserste angestrengt, und die psychische Folge wird Unlust.

Diese Auffassung der Sache scheint eine so exzeptionelle Erscheinung wie das Erschrecken leicht und natürlich erklären zu können. Da dieselbe durch einen plötzlichen, kurzen aber starken Sinnesreiz hervorgerufen wird, mufs dieser im Zentralorgan eine grofse Arbeitsleistung von einer begrenzten Anzahl Neuronen verlangen, die folglich stark angestrengt werden — somit ist die Unlust gegeben. Da der Reiz aber sofort wieder aufhört, wird der totale Energieverbrauch nur gering, es findet kein Energiezuflufs nach den arbeitenden Neuronen statt, die Bewegung breitet sich nur aus

und bewirkt eine Bahnung in anderen Zentren — somit ist die Vermehrung der Muskelarbeit gegeben. Für die Richtigkeit der Erklärung spricht sicherlich die bekannte Erfahrung, dafs man gewöhnlich nur über das Unerwartete erschrickt, schwerlich dagegen über etwas Erwartetes, auf das die Aufmerksamkeit schon vorher gelenkt war. Die Lenkung der Aufmerksamkeit auf einen erwarteten Reiz bedeutet nämlich, wie früher nachgewiesen, eine Bahnung der Bewegung in den empfangenden Neuronen. Ist die Bewegung aber im voraus angebahnt, so befindet sich mithin eine gröfsere Anzahl Neuronen in gleichartiger Erregung, und beim Eintreten des Reizes wird die hervorgerufene Bewegung sich sogleich über die gröfsere Gruppe von Neuronen ausbreiten können, so dafs jedes einzelne nicht so stark angestrengt wird. Hierdurch wird sowohl die Unlust als der vom Unerwarteten hervorgerufene Chok vermieden.

Das Resultat dieser Betrachtungen wird also, dafs es für die Gefühlsbetonung eines psychischen Zustands ohne Bedeutung ist, ob während des psychophysiologischen Prozesses eine gröfsere oder geringere Menge Hirnenergie umgesetzt wird. Das, worauf es ankommt, ist ausschliefslich, eine wie grofse Arbeit das einzelne Neuron leisten soll. Sogar ein sehr geringer Energieverbrauch kann eine Unlustbetonung bewirken, wenn die Arbeit von einer stark beschränkten Anzahl Neuronen geliefert werden soll (das Erschrecken), während sogar grofser Energieverbrauch Lustzustände zu erzeugen vermag, wenn nur der Verbrauch über eine hinlängliche Anzahl Neuronen verteilt ist. Die Frage ist nun, ob sich nicht eine etwas schärfere Grenze zwischen Lustzuständen und Unlustzuständen angeben läfst, denn Begriffe wie wenig und viel, klein und grofs sind doch gar zu relativ, um eigentlich etwas zu besagen. Wünschenswert wäre es natürlich, wenn die Grenze sich einfach durch die durchschnittliche Anzahl der während 1 Sek. pr. Neuron verbrauchten Grammkalorien angeben liefse, auf dergleichen absolute Bestimmungen müssen wir einstweilen aber wohl verzichten. Dagegen scheinen die Versuche zu zwei Bestimmungen zu führen, die, obschon nicht in Zahlen

ausgedrückt, dennoch auf ihre Art ebenso scharf sind.

Gehen wir erstens davon aus, daſs Lustgefühle stets von einer Bahnung, also u. a. von einer Vermehrung der gleichzeitigen Muskelarbeit, begleitet werden, so scheint das Maximum des Lustgefühls hierdurch bestimmt zu sein, denn die Bahnung andrer Prozesse von einem arbeitenden Zentrum aus ist, wie wir sahen, nur dann möglich, wenn keine Energieströmung nach dem Arbeitszentrum stattfindet. Wie gering der Energieverbrauch während eines Lustzustandes auch sein mag, so muſs doch immer etwas Energie verbraucht werden. Andauernder Verbrauch ohne Zufuhr ist aber unmöglich. Geht während eines Lustzustandes vom Arbeitszentrum daher fortwährend eine Bahnung aus, so ist dies nur denkbar, wenn der Energieverbrauch auf anderem Wege gedeckt wird. Es muſs dann der Stoffwechsel sein, der unablässig die verbrauchte Energie ersetzt; wir kennen wohl keine andere Thätigkeit, die im stande wäre, dies zu thun. Wir kommen also zu dem Ergebnisse, daſs ein psychophysiologischer Prozeſs einen lustbetonten psychischen Zustand herbeiführen wird, solange die im Prozesse umgesetzte Energie durch den Stoffwechsel ersetzt werden kann. Nun wissen wir aber, daſs das Lustgefühl bis zu einem gewissen Punkte mit dem Reize anwächst. Sehr schwache Reize ererzeugen gewöhnlich nur geringe Lust; wächst die Stärke des Reizes, mithin der Umsatz im Zentralorgane, so wächst auch das Gefühl bis zu einem Maximum, worauf es abzunehmen beginnt. Es wird daher eine höchst natürliche Annahme, daſs der psychische Kulminationspunkt gerade mit dem Wendepunkte des physiologischen Prozesses zusammentrifft, an welchem der Stoffwechsel nicht mehr im stande ist, den Verbrauch zu ersetzen. Wird diese Grenze nämlich überschritten, so muſs die Bahnung schnell abnehmen, weil das Arbeitszentrum jetzt Energiezufuhr aus den Umgebungen verlangt. An dieser Verminderung der Bahnung haben wir daher das physiologische Anzeichen, daſs das Lustgefühl abnimmt. Wie man sieht, gibt es also vollständigen Parallelismus der beiden Reihen, der psychischen und der physiologischen.

Wir suchen nun ferner das Verhältnis zwischen dem psychischen Zustand und dem zentralen Energieumsatze zu bestimmen, wenn letzterer fortwährend zunimmt. Was die psychische Reihe betrifft, so macht die Selbstbeobachtung uns die Sache völlig klar. Nach Überschreitung des Maximums des Lustgefühls nimmt das Gefühl schnell ab, und es tritt ein zwischen Lust und Unlust schwankender Zustand ein, der oft neutral sein wird. Ist die Ursache des Gefühls ein Sinnesreiz, so wird es meistens zwar nicht möglich sein, den neutralen Übergangspunkt nachzuweisen, dies rührt bekanntlich aber aus anderen Ursachen her[1]. Dagegen ist ganz gewifs der gröfste Teil dessen, was man im täglichen Leben »Arbeit« nennt, die angewohnte routinemäfsige Arbeit, ziemlich neutral. Dieselbe ist zu anstrengend, um ein Genufs zu sein, wenn aber keine besonderen Umstände hinzutreten, ist sie zu gut eingeübt, um geradezu unangenehm zu werden. Ein derartiger Zustand ist schwankend; kleine Zufälligkeiten können im einen Augenblick eine schwache Lust hervorrufen, im nächsten eine mehr oder weniger deutliche Unlust, gerade durch diese Schwankungen verrät sich aber der durchweg neutrale Charakter des Zustands. Bei stärkerer Reizung, gröfserer Anstrengung geht der Zustand schliefslich in entschiedene Unlust über[2].

---

[1] Die Hauptgesetze des menschlichen Gefühlslebens. S. 177 u. f.

[2] Diese Thatsache wird nicht im geringsten durch die ebenso unbestreitbare Thatsache umgestofsen, dafs eine unvorhergesehene Schwierigkeit, die während der routinemäfsigen, langweiligen Arbeit eintritt, mitunter fast als Annehmlichkeit gefühlt werden kann. Für energische Naturen, welche die aus der Überwindung von Schwierigkeiten resultierende Befriedigung kennen, wird eine solche Unterbrechung der einförmigen Arbeit oft Anziehung enthalten. Darum ist die Schwierigkeit der Arbeit, solange dieselbe nicht überwunden ist, aber dennoch unlustbetont; lockend ist nur die künftige Befriedigung durch Überwindung der Schwierigkeit. Bekanntlich ist jedermann sogar mit Freuden willig, sich einer schwierigen und unangenehmen Arbeit zu unterziehen, wenn nur die Belohnung hierfür hinlänglich grofs zu sein scheint. Welche Belohnung aber als für ein gewisses Quantum Ungemach hinlänglich betrachtet wird, das ist in höchstem Grade individuell verschieden. Die weitere Entwickelung dieses Problems ist in der Theorie der Nationalökonomie vom Grenznutzen gegeben.

Die physiologischen Prozesse, an welche die erwähnten psychischen Erscheinungen gebunden sind, haben wir zum Teil bereits erörtert. Wenn der Stoffwechsel allein die Arbeit nicht zu unterhalten vermag, hört die Bahnung auf, indem der intercelluläre Energiestrom eintritt. Hiermit ist doch keineswegs Unlust gegeben, denn die Versuche zeigten, daſs sehr bedeutender Energieverbrauch stattfinden kann, ohne daſs die Arbeit deshalb unlustbetont wird. Ebensowenig tritt bei einer bestimmten Gröſse des Energieverbrauches Unlust ein, denn ein kleiner Energieverbrauch kann lebhafte Unlust erzeugen, wenn die Arbeit von einer beschränkten Anzahl Neuronen geliefert werden soll. Dies deutet offenbar darauf hin, daſs die Unlust erst beginnt, wenn eine Gruppe von Neuronen nicht mehr im stande ist, die von ihr verlangte Arbeit zu leisten. Können der Stoffwechsel und die intercelluläre Energieströmung im Verein dem Arbeitszentrum keine so groſse Energiemenge zuführen, wie in jedem Augenblick wegen der eintreffenden Reize verlangt wird, so ermüden die Neuronen, und hiermit scheint die Unlust gegeben zu sein. Ob der Energieverbrauch, absolut genommen, dann groſs oder klein ist, wird ganz davon abhängen, über einen wie groſsen Umfang die Bewegung sich ausbreitet, oder mit anderen Worten, wie viele Neuronen an der Arbeit direkt beteiligt sind.

Wir können diese Betrachtungen nun in folgenden Satz zusammenfassen:

Wenn ein psychophysiologischer Prozeſs keinen gröſseren Verbrauch der Energie jedes einzelnen arbeitenden Neurons erfordert, als daſs der Stoffwechsel fortwährend den Verbrauch zu ersetzen vermag, so wird die psychische Wirkung hiervon ein Lustgefühl sein, während die physiologische Wirkung die Bahnung von Bewegungen in anderen Zentren wird. Das Maximum des Lustgefühls wird erreicht, wenn der Stoffwechsel den stattfindenden Verbrauch gerade zu decken vermag. Bei Überschreitung dieser Grenze nimmt sowohl das Lustgefühl als die Bahnung schnell ab, indem der Verbrauch im Arbeits-

zentrum nun einen Energiestrom aus den Umgebungen bewirkt, wodurch gleichzeitige Prozesse in letzteren gehemmt werden. Der psychische Zustand ist unter diesen Verhältnissen zunächst neutral, je nach den Umständen bald zur Lust, bald zur Unlust tendierend. Wird endlich der Verbrauch in den arbeitenden Neuronen so grofs, dafs er nicht durch den Stoffwechsel im Verein mit dem intercellulären Energiestrom gedeckt werden kann, so wird die psychische Wirkung ein Unlustgefühl werden. Eine Hemmung anderer, gleichzeitiger Prozesse wird deshalb stets das Unlustgefühl begleiten, ausgenommen, wenn dieses nur von rein instantaner Dauer ist, so dafs kein Energiestrom zu stande kommt; alsdann wirkt die Bewegung im Arbeitszentrum bahnend (das Erschrecken).

Diese Theorie ist, wie leicht zu ersehen, ihren Grundzügen nach keine neue; sie ist nur eine weitere Entwickelung und Präzisierung der von Grant Allan aufgestellten dynamischen Gefühlstheorie. Zu dieser wurde ich seiner Zeit durch eine Reihe kritischer Betrachtungen über verwandte Theorien bewogen, die von anderen Forschern aufgestellt waren[1]; es ist deshalb nicht ganz ohne Bedeutung, dafs wir nun von neuen Thatsachen aus zu demselben Resultat gelangen. Zwischen der neuen und der älteren Formulierung besteht indes ein nicht ganz unwesentlicher Unterschied. Nach Grant Allans Darstellung ist es nämlich der Energieverbrauch im Sinnesorgane, der entscheidet, ob ein Lust- oder ein Unlustgefühl entstehen soll; wie die Theorie aber hier formuliert ist, wird der Energieverbrauch im Zentralorgane, namentlich in den arbeitenden Neuronen, entscheidend. In der Realität ist dies natürlich ganz dasselbe, denn nur, insofern der Energieverbrauch des Sinnesorganes einen korrespondierenden Verbrauch im Zentralorgan bewirkt, können aus diesem Verhalten die psychischen Wirkungen: Lust und Unlust

[1] Die Hauptgesetze des menschlichen Gefühlslebens. S. 153 u. f.

hervorgehen. Die nähere Präzisierung dieser Sache ist dennoch nicht ohne Bedeutung, da die Theorie erst hierdurch praktische Wichtigkeit erhält. Erscheinungen zu erklären vermag, die sonst ganz rätselhaft dastünden. Jedenfalls kann die Theorie in ihrer ursprünglichen Form nicht auf diejenigen Gefühlszustände zur Anwendung kommen, welche nur in geringem Grade oder auch gar nicht von äufseren Reizen abhängig sind.

Besonderes Interesse erhält die Gefühlstheorie auch dadurch, dafs sie die Beantwortung der von G. E. Müller aufgeworfenen Frage gibt: »was das psychische Korrelat der Ausbreitung der psychophysischen Thätigkeit sei«[1]. Müller weist nach, dafs es hier verschiedene Möglichkeiten gibt, dafs wir aber auf dem jetzigen Standpunkte unseres Wissens nicht im stande sind, einer einzelnen derselben den Vorzug zu geben. Er läfst die Frage deshalb zunächst dahingestellt bleiben, indem er Fechners Auffassung beitritt, »nach welcher die Ausbreitung des psychophysischen Prozesses ihr psychisches Korrelat nicht an einer von der Empfindungsintensität verschiedenen Dimension der Empfindung besitzt, sondern eine Vergröfserung oder Verminderung jener Ausbreitung psychophysisch völlig äquivalent ist einer ohne Veränderung der Ausbreitung des psychophysischen Prozesses stattfindenden, bestimmten Erhöhung, bez. Verringerung der Stärke desselben«. Es ist leicht zu ersehen, dafs die dynamische Gefühlstheorie hier eine andere Beantwortung geben mufs, indem sie der räumlichen Ausbreitung eines Prozesses ganz andere Bedeutung beilegt. Die Stärke der Empfindung ist, wie wir wissen, proportional der Gröfse des zentralen Energieumsatzes. Der Theorie zufolge ist die Gefühlsbetonung der Empfindung dadurch bestimmt, wieviel Arbeit von den arbeitenden Neuronen verlangt wird. Ist also ein Energieumsatz bestimmter Gröfse in verschiedenen Fällen über eine bald gröfsere, bald kleinere Anzahl Neuronen verteilt, so erhalten wir in allen Fällen eine Empfindung bestimmter Stärke; nur der Gefühlston verändert sich nach der Anzahl der am

---

[1] Zur Psychophysik der Gesichtsempfindungen. Zeitschr. f. Psych. Bd. X, S. 8.

Prozesse beteiligten Neuronen. Diese Konsequenz der Theorie scheint übrigens zu zeigen, dafs die ganze Frage nur geringe Bedeutung besitzt. Denn da die Gefühlsbetonung gewöhnlich der Empfindung, mithin der Gröfse des zentralen Energieumsatzes, ziemlich proportional anwächst, deutet dies darauf hin, dafs ein Prozefs bestimmter Art annähernd konstante räumliche Ausbreitung hat, so dafs den arbeitenden Neuronen stets ein konstanter Bruchteil des gesamten Energieumsatzes zufällt.

Wir können uns hier nicht wohl darauf einlassen. die Bedeutung und Tragweite der dynamischen Gefühlstheorie zu untersuchen; dies würde mit einer vollständigen Durcharbeitung der ganzen Lehre vom Gefühle gleichbedeutend sein. Ein paar einfache, unter den elementarsten Erscheinungen gewählte Beispiele werden genügen, um zu zeigen, wie die Theorie in der hier dargestellten Form eine leichte und ungezwungene Erklärung verschiedener Thatsachen gibt, die man früher wohl kaum zu erklären versucht hat. So hat Weber bekanntlich folgendes Gesetz für Temperaturreize nachgewiesen: »Der Schmerz entsteht um so leichter, je gröfser die dem Reize ausgesetzte Hautoberfläche ist[1].« Näher bestimmt heifst das: damit ein Wärmereiz ebenmerklichen Schmerz hervorrufen kann, mufs die Temperatur um so niedriger sein, je gröfser die angegriffene Stelle der Hautoberfläche ist. Dies ist nun gewifs leicht zu verstehen. Schmerz entsteht, wenn der Energieverbrauch der arbeitenden Neuronen durch die Zufuhr nicht gedeckt werden kann. Der zentrale Energieumsatz wird aber durch die Energie des Reizes bestimmt. Es kommt also nur darauf an, dafs diese eine bestimmte Gröfse hat. Folglich wird jede Arealeinheit der Hautoberfläche um so geringerer Wärmezufuhr benötigt sein, je gröfser das gereizte Areal ist, oder mit anderen Worten: das Produkt des Areals und der Temperaturerhöhung mufs konstant sein. Genaue Gültigkeit wird dieser Satz jedoch wohl kaum haben, denn

---

[1] Tastsinn und Gemeingefühl, in Wagners Handwörterbuch der Physiologie. Bd. III, Abt. 2. S. 572—573. Vgl. Die Hauptgesetze. S. 36 u. f.

mit der Gröfse des Areals nimmt wahrscheinlich auch die Anzahl der arbeitenden Neuronen zu, und wenn eine gröfsere Anzahl Neuronen in Thätigkeit gesetzt wird, mufs auch die Energie des Reizes anwachsen, damit Schmerz entstehe. Man findet deswegen auch, dafs das Produkt des Hautareals und der Temperaturerhöhung nicht ganz konstant ist, sondern mit dem Areale zunimmt, freilich viel langsamer als dieses. Die nähere Untersuchung dieses Verhältnisses würde bedeutendes Interesse darbieten.

Bekanntlich spielt die Gefühlsbetonung bei den niederen Sinnen eine weit mehr hervortretende Rolle als bei den höheren. Besonders erweist dies sich dadurch, dafs nur die allerstärksten Gesichts- und Gehörsreize im stande sind, unlustbetonte Empfindungen hervorzurufen, während wir auf dem Gebiete der niederen Sinne oft schon bei verhältnismäfsig schwachen Reizen Unlust fühlen. Auch dies ist durch die gegebene Theorie leicht zu erklären, da die Entstehung der Unlust wesentlich durch die Energie des Reizes bestimmt wird, und in dieser Beziehung besteht ein bedeutender Unterschied zwischen den Reizungen der niederen und den adäquaten Reizungen der höheren Sinne. Fällt ein kleiner Tropfen (0,05 gr) siedenden Wassers auf die Haut, und nehmen wir an, dafs nur die Hälfte des Wärmeüberschusses an den Organismus abgegeben wird, während die andere Hälfte verloren geht, so hat die Energie des Reizes etwa 2 gr cal. betragen. Diese Energiemenge ist im Vergleich mit der Energie unserer gewöhnlichen Schall- und Lichtreize aber ungeheuer grofs. Fällt eine 10 gr wiegende metallene Kugel aus der Höhe von 1 m auf eine harte Unterlage, und wird der erzeugte Schall in der Entfernung von 10 cm von der Anschlagsstelle durch das Ohr aufgefafst, so wird die Gröfse der als Schallwellen in das Ohr eindringenden Energiemenge schwerlich 0,0001 gr cal. erreichen; diese Schallstärke entspricht ungefähr der einer kräftigen Redestimme. Noch weit geringer ist die Energie des Lichtes. Eine Normal-Spermazetkerze entsendet in der Form von Lichtstrahlen etwa 4 gr cal. pr. Min. Ein Auge, das die Flamme in der Entfernung von 1 m betrachtet, wird pr. Sek. nur eine Energiemenge von

0.0 000 002 gr cal. erhalten, und dies ist obendrein als ein recht kräftiger Lichtreiz anzusehen. Ein Stückchen weifsen Papiers, das von demselben Lichte in einer Entfernung von 1 m beleuchtet wird, sendet nur ein Tausendstel der angegebenen Lichtmenge zum Auge. Nun besteht allerdings kein so grofses Mifsverhältnis zwischen den zentralen Energieumsätzen, die durch die drei genannten Reize hervorgerufen werden, denn die Terminalorgane der Temperaturnerven sind durch die Oberhaut, die ein schlechter Wärmeleiter ist, vor den starken Reizen beschützt, wogegen das Ohr und das Auge Ansammlungsapparate sind, welche die schwachen Reize konzentrieren. Deshalb wird es möglich, dafs so minimale Energiemengen, wie unsere gewöhnlichen Gesichtsreize, überhaupt zentrale Prozesse hervorzurufen vermögen; durch die Haut hindurch würde die gleiche Energiemenge durchaus keine Empfindung auslösen. Obgleich unsere Sinnesapparate also zum Teil der Gröfse der Energie der Reize angepafst sind, ist es doch verständlich, dafs nur maximale Gesichtsreize die empfangenden Neuronen in so starke Aktivität setzen werden, dafs Unlust damit verbunden ist. Eine derartige Thätigkeit wird aber schon durch relativ schwache Temperaturreize hervorgerufen werden, weil diese eine weit gröfsere Energiemenge repräsentieren.

Es mag noch ein einzelnes Verhältnis in Kürze hier berührt werden. Wie wir wissen, ist Rot unter allen Farben diejenige, die am leichtesten zu kräftig wirkt; in der Ornamentik ist Rot deshalb immer mit gewisser Mäfsigung zu gebrauchen. Dies stimmt damit überein, dafs Rot gerade diejenige Farbe ist, die, bei gegebener Intensität der Lichtstrahlen, den gröfsten zentralen Energieumsatz hervorruft. Auch der Gegensatz zwischen der anregenden Wirkung der warmen und der dämpfenden Wirkung der kalten Farben scheint auf der relativen Gröfse der zentralen Energieumsätze zu beruhen. Diese ist nämlich, bei gegebener Intensität der Strahlen, am bedeutendsten hinsichtlich der weniger brechbaren Strahlen. Weiter können wir uns auf diese Verhältnisse hier jedoch nicht einlassen, da die erforderliche empirische Grundlage bis jetzt nicht vorliegt.

Die Tragweite der dynamischen Gefühlstheorie näher

zu entwickeln, würde, wie gesagt, gar zu weit führen, und die Frage hat gar zu grofse Bedeutung, als dafs wir uns auf eine ganz oberflächliche Behandlung beschränken könnten. Soweit ich zu ersehen vermag, wird die Theorie in der hier gegebenen Form aber wirklich im stande sein, die wesentlichsten der auf dem Gebiete des Gefühlslebens bekannten Gesetzmäfsigkeiten natürlich und zwanglos zu erklären. Freilich können wir nicht erwarten, für alle speziellen Gefühlsgesetze eine Erklärung durch die Theorie zu finden, denn diese gibt nur die Bedingungen für die Entstehung und die Variationen der Gefühlstöne an, sagt aber nichts darüber, wann das Eintreten dieser Bedingungen zu erwarten ist. Erscheinungen wie der Kontrast und die Expansion des Gefühls lassen sich deshalb nicht unmittelbar durch die Theorie erklären, die vollkommen richtig sein kann, selbst wenn man daraus nicht zu schliefsen vermag, dafs ein Gefühl mit Notwendigkeit auf ein nachfolgendes influieren müsse. Es sind hier also verschiedene Rücksichten zu nehmen, wenn man die Tragweite der Theorie prüfen will, dies würde uns aber von unserer eigentlichen Aufgabe zu weit abbringen.

Auch auf Wundts Auffassung der Gefühle als eines tridimensionalen Systems[1] wage ich nicht, mich hier einzulassen. Die dargestellte theoretische Auffassung der Ursachen der Lust und Unlust ist offenbar ganz davon unabhängig, ob es aufser dem Gegensatze der Lust und der Unlust noch andere, ebenso primitive und irreduktible Gefühlsarten gibt. Einstweilen mufs ich gestehen, dafs die Notwendigkeit einer solchen Annahme mir nicht ganz einleuchtend ist. Die beiden anderen Dimensionen, deren Aufstellung Wundt für notwendig erachtet hat, nämlich die Exaltation-Depression und die Spannung-Lösung, scheinen mir keineswegs so unzusammengesetzte Erscheinungen zu sein. Zustände der Exaltation und der Depression lösen sich mir in eine primäre Lust oder Unlust und verschiedene ebenfalls betonte Organempfindungen auf. Die Bedeutung der Organempfindungen für Affekte und Stimmungen bestreiten zu wollen, scheint mir sehr bedenklich;

---

[1] Bemerkungen zur Theorie der Gefühle. Phil. Stud. Bd. XV.

das hiefse wohl ungefähr, das Fundament der Psychologie selbst: die Selbstbeobachtung erschüttern wollen. Wenn ich mich »erhoben, leicht« oder »niedergedrückt, beschwert« fühle, so sind diese aus dem täglichen Leben wohlbekannten Ausdrücke durchaus keine Bilder, sondern Bezeichnungen für sehr deutliche Empfindungen; man hat wirklich gleichsam das Gefühl, dafs eine Bürde auf einem lastet u. s. w. Bestreitet man, dafs dergleichen Zustände Empfindungen von Veränderungen im Organismus sind, so begeht man, meines Ermessens, einen ebenso grofsen Fehler, als wenn man zur entgegengesetzten Äufserlichkeit geht und glaubt, man könne aus der Art der Empfindungen schliefsen, welche physiologischen Veränderungen stattgefunden hätten. Letzteres ist somnambulistisch-spiritistischer Aberglaube, der ohne Zweifel verwerflich ist; man sollte aber doch das Kind nicht mit dem Bade ausschütten. Weil man aus den Empfindungen keine Schlüsse über die speziellen physiologischen Ursachen zu ziehen vermag, braucht man darum doch nicht zu bezweifeln, dafs sie aus physiologischen Ursachen entstehen. Da nun die psychologische Analyse, soweit ich zu erblicken vermag, die Exaltation und die Depression in verschiedene primitive Erscheinungen auflösen mufs, so liegt kein Grund vor, diese Zustände als besondere Gefühlsarten zu bezeichnen.

Was ferner die Spannung betrifft, so läfst es sich gewifs nicht bestreiten, dafs dieselbe in ihren entschiedenen Formen als Affekt auftritt; die Teilnehmer an einer schwierigen Bergbesteigung, die Zuschauer bei einem Stierkampf, die Leser eines »spannenden« Romans werden mir unbedingt recht geben. Jedoch kommt der Affekt, ebenso wie alle anderen Affekte, nur in einzelnen Situationen und während einzelner Augenblicke zum Ausdruck; sonst besteht der Zustand nur als eine Stimmung, als eine gewisse unbestimmte Erwartung, dafs wieder etwas eintreffen wird. Diese Stimmung kann mit sehr verschiedener Stärke auftreten, und in ihren schwächsten Formen ist das Individuum sich derselben wohl kaum bewufst, während sie sich dennoch durch eine gewisse gespannte Aufmerksamkeit äufsert. Mit letzterem Zustande haben wir gewöhnlich im Labora-

torium zu thun gehabt; die V-P erwartet, es müsse etwas geschehen, dieses Etwas ist an und für sich aber so bedeutungslos und die Spannung mithin so gering, dafs nur die Plethysmogramme das Vorhandensein des Zustands verraten, während die V-P selbst es gar nicht gewahrt, dafs ihr Zustand kein völlig normaler ist. Der Dr. Liebmann (P. L.), einer meiner gewöhnlichen Mitarbeiter, erhob gelegentlich einen Protest dagegen, dafs ich diesen Zustand als weniger normal bezeichnete. Er meinte nämlich, was wir Spannung zu nennen pflegten, sei eigentlich der völlig wache Normalzustand, wogegen unser sogenannter Normalzustand ein Dusel, ein Schritt auf dem Wege zum Halbschlummer hinab sei. Gegen diese Art und Weise, die Sache zu betrachten, läfst sich eigentlich weder in psychologischer noch in physiologischer Beziehung ein Einwurf erheben. In psychischer Beziehung ist die Spannung (in den hier besprochenen schwächeren Formen) nur die Kulmination des wachen Zustandes; das Individuum sitzt in gespannter Aufmerksamkeit, bereit, zu empfangen, was geschehen wird. Von hier an findet man darauf einen ganz sanften Übergang durch den ruhigeren, weniger gespannten Normalzustand hindurch bis zur völligen Erschlaffung der Aufmerksamkeit im Schlafe. Den physiologischen Ausdruck für diese ganze Stufenreihe von Zuständen haben wir an den Plethysmogrammen. Während der Spannung erblicken wir ein kleines Volumen mit geringer Pulshöhe, und von hier an geschieht der Übergang allmählich durch fortwährende Zunahme des Volumens und der Pulshöhe hindurch erst bis zum Normalzustande und schliefslich zum Schlafe mit dessen enormem Volumen und grofsem schlaffem Puls.

Die Darstellung, die ich im 1. Teile dieses Werkes von der Spannung gegeben habe, ist von einem geehrten Kritiker[1] als sich selbst widersprechend und unklar bezeichnet worden. Sich selbst widersprechend sei sie, weil ich die Spannung bald einen Affekt, bald eine Stimmung und bald wieder »einen durchaus unbetonten Zustand der Aufmerksamkeit« nenne. Dem Obigen zu-

---

[1] Dr. M. Brahn in der Zeitschrift für Psych. u. Phys. Bd. 25. S. 219 u. f.

folge kann ich nicht zugeben, dafs hier ein Widerspruch stattfinden sollte; thatsächlich ist die Spannung, je nach ihren verschiedenen Stärkegraden, bald das eine, bald das andere. Will man die Spannung selbst in solchen Zuständen, wo das Individuum sich derselben nicht bewufst ist, ein Gefühl nennen, so mufs auch der Normalzustand als eine besondere Gefühlsart betrachtet werden. Ein Selbstwiderspruch findet sich hier also nicht; es handelt sich nur um verschiedene Intensitätsstufen desselben Zustandes, und dafs es berechtigt ist, diesen Zustand Spannung zu nennen, dafür habe ich den experimentellen Beweis beigebracht (1. Teil. S. 83—84). Dafs meine Selbstwidersprüche darauf Unklarheit verursachen sollten, indem ich ganz verschiedene Zustände unter der gemeinschaftlichen Benennung der Spannung miteinander vermengt hätte, kann ich meinem Kritiker noch weniger zugeben. Denn da die Spannung sich, psychisch betrachtet, nicht präzisieren läfst, definierte ich sie sehr eingehend und genau mittels ihrer plethysmographischen Wirkungen (S. 89), und wo ich mich nicht auf unzweifelhafte plethysmographische Merkmale stützen konnte, habe ich nirgends das Vorhandensein einer Spannung vorausgesetzt. Eine solche Definition dürfte wohl bedeutend klarer und schärfer sein als eine Abgrenzung der verschiedenen psychischen Zustände der Spannung, der Erwartung, der Aufmerksamkeit u. s. w. Dagegen gebe ich mit Freuden Herrn Brahn recht, wenn er meint, die psychologische Erklärung der Verminderung der Spannung durch äufseren Reiz, die ich gegeben habe, sei ziemlich unverständlich; nur rührt dies nicht von einer Unklarheit meiner Auffassung der Sache her, sondern hat ausschliefslich seinen Grund in der Unmöglichkeit, befriedigende psychologische Erklärungen psychophysiologischer Thatsachen zu geben. Jede derartige Erklärung mufs nämlich stets der Natur der Sache zufolge die eine, sehr wichtige Seite — die physiologische — überschlagen. Faktisch liegt folgendes vor. Das Individuum befindet sich in Spannung, die sich meines Erachtens am besten psychologisch als ein Zustand der Aufmerksamkeit charakterisieren läfst, der physiologisch durch bestimmte körperliche Reaktionen gekennzeichnet wird. Ein äufserer Reiz ruft

nun eine Änderung dieses psychophysiologischen Zustands hervor; der Grad der Aufmerksamkeit wird ein andrer, und somit treten auch andre Reaktionen auf. Es zeigt sich indes empirisch, dafs der neue organische Zustand sich so auffassen läfst, als wäre er hervorgebracht durch Interferenz der Veränderungen, welche eine Verminderung oder Aufhebung der Spannung erzeugen würde, und der Reaktion, welche der Reiz an sich bewirken würde, wenn anfänglich keine Spannung stattgefunden hätte. Je gemäfs der Stärke des Reizes und der Stärke der ursprünglich bestehenden Spannung erhalten wir in den verschiedenen Fällen deswegen ganz verschiedene Reaktionen. Von dieser psychophysiologischen Thatsache habe ich eine Art Erklärung zu geben gesucht, indem ich dieselbe psychologisch umschrieb und von einer Teilung der Aufmerksamkeit redete, so dafs die Spannung bis zu einem gewissen Grade bestehen bliebe, während die Aufmerksamkeit übrigens auf den Reiz gelenkt würde. Ich gestehe, dafs hierin nicht viel Sinn ist. Zu meiner Entschuldigung kann ich nur sagen, dafs das meiste von dem, was für psychologische Wissenschaft ausgegeben wird, gerade aus dergleichen Umschreibungen besteht, mittels deren man vage psychologisch-systematische Bestimmungen gibt statt die verlaufenden psychophysiologischen Prozesse auseinanderzusetzen. Ich gebe meinem geehrten Kritiker das Versprechen, dafs ich mich künftig befleifsen werde, von derartiger Wissenschaftlichkeit Abstand zu nehmen.

Um mich kurz zu fassen: Ich halte auch ferner die Spannung in ihren mehr alltäglichen Formen, unter denen das Individuum sich selten derselben bewufst ist, nur für einen potenzierten wachen Zustand, der sich psychisch am besten durch die gesteigerte Aufmerksamkeit charakterisieren läfst. Will man diesen Zustand ein Gefühl nennen, so ist auch der wache Zustand selbst als ein geringerer Stärkegrad dieses Gefühls aufzufassen. Dies wird aber doch gewifs ein gar zu gekünstelter Sprachgebrauch. Ich fühle mich deshalb bis jetzt noch nicht überzeugt, dafs durch die Lehre von den drei Dimensionen des Gefühls Wesentliches zu erreichen sei, sollte ich aber zu besserer Erkenntnis ge-

langen, so werde ich kein Hehl daraus machen. Ich habe kein philosophisches System, das ich um jeden Preis — den Thatsachen gemäfs oder zuwider — zu verteidigen hätte.

SCHLUSS.

Das wesentlichste Resultat aller im Vorhergehenden angestellten Untersuchungen wird wohl dieses: die Intensität der Bewufstseinserscheinungen wird bestimmt durch die Gröfse desjenigen Energieumsatzes im Zentralorgan, an welchen die einzelne Bewufstseinserscheinung gebunden ist. Wir fanden nämlich erstens, dafs die Unterscheidungsgesetze sich auf den beiden wesentlichsten Sinnesgebieten aus bekannten physischen und physiologischen Gesetzen herleiten lassen, unter der Voraussetzung, dafs die Stärke der Empfindung dem zentralen Energieumsatze proportional ist. Ferner sahen wir, dafs derjenige Bruchteil der freien Energie des Gehirns, welcher während einer gegebenen psychischen Arbeit umgesetzt wird, um so gröfser ist, je gröfser die psychische Arbeit wird, und dafs letztere sich überhaupt nur dann verrichten läfst, wenn die Gröfse des Energieumsatzes ein gewisses, von der Gröfse der Arbeit abhängiges Minimum übersteigt. Es scheint also keinem Zweifel unterliegen zu können, dafs die psychischen Erscheinungen quantitativ durch die Gröfse des zentralen Energieumsatzes bestimmt sind. Ist es aber gegeben, dafs jede psychische Erscheinung einen gewissen Energieverbrauch erfordert, so läfst die Konsequenz sich schwerlich vermeiden, dafs der psychische Zustand auch in qualitativer Beziehung durch die nähere Beschaffenheit des physiologischen Prozesses (Lokalisation, Schwingungsverhältnisse u. s. w.) bestimmt ist. Die Bewufstseinserscheinungen scheinen mithin völlig von den zentralen physiologischen Prozessen abhängig zu sein.

Dies widerspricht nun, scheinbar wenigstens, dem ebenso wohlbegründeten Resultate, zu dem wir im ersten Teile dieses Werkes gelangten, nämlich: ein

äuſserer Reiz muſs bis zum Bewuſstsein durchdringen, um organische Reaktionen verursachen zu können (1. Teil, S. 158). Hiernach könnte es so aussehen, als wäre der zentrale physiologische Prozeſs allein nicht im stande, die Reaktionen auszulösen, und daſs organische Reaktion erst hervorgerufen würde, wenn das Bewuſstseinsphänomen als neues Element hinzukäme. So ist die Sache ausgelegt worden, und gegen diese Auffassung ist von physiologischer Seite ein mehr energischer als eigentlich wohlbegründeter Protest erhoben worden[1]. Eben die Auslegung, gegen die protestiert wird, ist jedoch ganz unberechtigt; wenigstens habe ich niemals angedeutet, daſs die Bewuſstseinserscheinung ein von dem zentralen Prozeſs unabhängiges Moment sein sollte. Es ist eine rein empirische Thatsache, daſs ein Reiz bis zum Bewuſstsein durchdringen muſs, um in normalen Menschen organische Reaktionen auszulösen, und in diesem Satze liegt durchaus keine theoretische Auffassung der Sache versteckt. Meine plethysmographischen Versuche gaben keinen Aufschluſs über die zentralen physiologischen Prozesse, sie konnten nur feststellen: 1) bestimmten, durch Selbstbeobachtung konstatierten Bewuſstseinszuständen entsprechen stets bestimmte organische Reaktionen, und 2) wenn ein bestimmter äuſserer Reiz im Individuum keinen bestimmten Bewuſstseinszustand erzeugt, so unterbleiben auch die organischen Reaktionen. Diese empirischen Daten faſste ich in dem angeführten Satze zusammen, daſs der Reiz bis zum Bewuſstsein durchdringen muſs, um organische Reaktionen auszulösen, und derselbe involviert mithin durchaus keine metaphysische Theorie. Im Gegenteil, jede andere Formulierung würde notwendigerweise erheischen, daſs man eine bestimmte theoretische Auffassung unterschöbe. Hierzu fand ich mich in der früheren, rein empirischen Untersuchung nicht veranlaſst. Da wir jetzt aber darüber ins reine gekommen sind, wie die Bewuſstseinserscheinungen durchweg durch die zentralen Energieumsätze bestimmt werden, möchte es begründet sein,

[1] C. Lange in der »Hospitalstidende«. Köbenhavn. 1899. S. 907 u. f.

die Frage aufzustellen: wie läfst es sich erklären, dafs die Entstehung eines psychischen Zustandes die notwendige Bedingung ist, damit organische Reaktionen ausgelöst werden?

Besondere Schwierigkeit kann diese Frage uns offenbar nicht verursachen. Denn da die psychischen Erscheinungen aufs engste an zentrale Energieumsätze gebunden sind, so beweist die Notwendigkeit des psychischen Zustands für die Entstehung der Reaktion nur, dafs die organischen Reaktionen keine Rückenmarkreflexe sind, sondern allein aus höheren Zentren ausgelöst werden. Ruft ein Reiz daher keinen bestimmten psychischen Zustand hervor, so liegt auch nichts Sonderbares darin, dafs er keine organische Reaktion erzeugt. Das Ausbleiben des psychischen Zustands sowohl als das der physischen Veränderungen beweist, dafs der Reiz nicht im stande war, den erforderlichen zentralen Energieumsatz zu bewirken. Oder, um es möglichst scharf zu präzisieren: die Entstehung des psychischen Zustands ist keine Bedingung für das Zustandekommen der organischen Reaktionen, sie ist nur das Anzeichen, dafs ein bestimmter zentraler Prozefs vorgeht. Anderseits sind die organischen Reaktionen auch nur Äufserungen des zentralen Prozesses, und folglich ist nichts Sonderbares darin enthalten, dafs der Bewufstseinszustand und die körperlichen Veränderungen einander begleiten müssen. Unterbleibt das eine, so mufs auch das andere unterbleiben, da alle beide nur verschiedene Äufserungen desselben zentralen Prozesses sind.

Eine andre Frage ist es, warum ein gegebener Reiz nicht immer einen bestimmten zentralen Prozefs hervorruft. Hierauf läfst sich ganz im allgemeinen natürlich keine Antwort geben; es kommt hier auf die vorliegenden Umstände an. Unter den Ursachen, die zum Gegenstand experimenteller Untersuchung gemacht werden können, behandelten wir im 1. Teil die Konzentration der Aufmerksamkeit auf einen gegebenen Bewufstseinsinhalt, die Hypnose und die Narkose. Am leichtesten verständlich ist die Sache im erstgenannten Falle. Wir sahen nämlich ja, dafs jede psychische Arbeit, die gröfseren Energieverbrauch erfordert, hierdurch auch

andere gleichzeitige zentrale Prozesse hemmt. Während einer gegebenen psychischen Arbeit wird ein äufserer Reiz deshalb gar nicht oder nur in geringem Grade im stande sein, den zentralen Energieumsatz auszulösen, den er unter anderen Verhältnissen hervorrufen könnte, da die Energie von der bereits bestehenden Arbeit beansprucht wird. Ist aber auf diese Weise die zentrale Wirkung des Reizes stark herabgesetzt, so müssen auch die davon abhängigen organischen Reaktionen bedeutend vermindert werden. Eben dies zeigten die Versuche (1. Teil. S. 156 u. f.). Was während der Hypnose vorgeht, wissen wir allerdings nicht genau, indes deuten aber alle Erfahrungen darauf hin, dafs die Aufmerksamkeit des Hypnotisierten in hohem Grade geschärft, wenn auch einseitig konzentriert ist. Psychophysiologisch heifst das nur, dafs sowohl Bahnung als Hemmung entschiedener ist, mit gröfserer Stärke vorgeht. Hieraus folgt nun ganz einfach, dafs ein äufserer Reiz, der unter normalen Verhältnissen leicht zum Bewufstsein kommen würde, aufser stande ist, im Hypnotisierten, dessen Bewufstsein von einem anderen Inhalte beansprucht wird, einen zentralen Prozefs auszulösen. Was endlich die Narkose betrifft, so bedarf es wohl kaum eines näheren Nachweises, dafs die Neuronen zur Arbeit unfähig gemacht werden können, indem das Protoplasma mehr oder weniger eingreifende, wenn auch nur temporäre Veränderungen erleidet. In allen diesen Fällen, wo ein gleichzeitiges Ausbleiben des Bewufstseinszustandes und der normalen organischen Reaktionen desselben konstatiert wurde, läfst dies sich also ohne Schwierigkeit dadurch verstehen, dafs der zentrale Energieumsatz nicht zu stande gekommen ist.

Alle unsere Erfahrungen führen somit zu demselben Resultate: es ist der zentrale Energieumsatz, der sowohl für den psychischen Zustand als für die begleitenden organischen Reaktionen bestimmend ist. Die Bedeutung der organischen Reaktionen zu erörtern, darauf können wir uns hier nicht einlassen; dies wird im dritten und abschliefsenden Teile dieses Werks zum Gegenstand der Untersuchung gemacht werden. Dagegen möchte hier Anlafs sein, das in der Einleitung berührte Problem, nämlich die Frage nach dem näheren Verhältnisse der

Bewufstseinserscheinungen zu den zentralen Energieumsätzen, eingehender zu betrachten. Wir sahen, dafs es hier zwei wesentlich verschiedene Möglichkeiten gab, indem das Psychische entweder an alle Energieformen, die durch Transformation der chemischen Energie im Gehirn entstehen, oder auch an eine einzelne bestimmte Energieform allein gebunden sein kann. Indem wir unter der P-Energie diejenige Energie verstanden, an welche das Psychische gebunden ist, erhielten wir für diese beiden Annahmen die beiden folgenden Formeln:

$$C = \overbrace{V + W + \ldots + X + Y + Z}^{P} \quad \ldots . \text{(Gleich. 4)},$$

wodurch angedeutet wird, dafs das Psychische an sämtliche Energien gebunden ist, und

$$C = P + V + W + \ldots + X + Y + Z \quad \ldots . \text{(Gleich. 5)},$$

welche Formel angibt, dafs man sich das Psychische als an eine einzelne bestimmte Energieform besonderer Art, P, gebunden denkt. Die Frage ist nun die, ob wir Grund haben, irgend eine dieser beiden Auffassungen vorzuziehen, oder ob alle beide gleich gut im stande sind, das thatsächlich Vorliegende zu erklären.

Die durch Gleich. 4 ausgedrückte Annahme ist der gewöhnliche Parallelismus, die »Zwei-Seiten-Theorie«, der Duplizismus. Indem man sich denkt, dafs jede Energietransformation im Gehirn ihre psychische Seite hat, erhält man hier eine doppelte Reihe von Erscheinungen, eine physische und eine psychische, mit ununterbrochenem Kausalzusammenhang jeder einzelnen Reihe, aber ohne Verbindung der beiden Reihen untereinander. Gegen diese Auffassung sind in der letzten Zeit viele Einwürfe erhoben worden. Man hat eingesehen — was Kroman übrigens schon 1888 äufserte[1] — dafs dieselbe eigentlich ein arger Dualismus ist, und die konsequenten Anhänger der Theorie sind bei deren Verfechtung in den wildesten Spiritualismus hinübergetrieben worden[2]. Ich werde mich auf diese ver-

---

[1] Kroman: Logik und Psychologie. 2. Ausg. Kopenhagen 1888. Deutsche Übersetzung. Leipzig 1890.

[2] Heymans: Zur Parallelismusfrage. Zeitschr. f. Psych. u. Phys. Bd. XVII. S. 62 u. f.

schiedenen Einwürfe nicht näher einlassen, da die Theorie mir unter jeglicher Form unhaltbar vorkommt. Denkt man sich nämlich, dafs die physische Kausalreihe dieselbe Realität habe wie die psychische, so wird es durchaus rätselhaft, welche Bedeutung das Psychische denn eigentlich hat. Dasselbe wird nur eine unwesentliche »Begleiterscheinung«, die man sich sehr wohl weggelassen denken könnte, ohne dafs das Dasein deswegen sein Aussehen auch nur im geringsten verändern würde. Will man diese Konsequenz nicht nehmen, sondern die Bedeutung des Psychischen im Dasein behaupten, so wird man, wie Heymans in der genannten Abhandlung, gezwungen, die physische Welt auf eine Illusion, eine Selbsttäuschung zu reduzieren. Es geht offenbar nicht an, das Dasein in zwei voneinander unabhängige Kausalreihen von gleicher Bedeutung zu spalten; das durch Gleich. 4 ausgedrückte Abhängigkeitsverhältnis zwischen dem Psychischen und den Transformationen der Energie im Zentralorgan läfst sich nicht durchführen.

Wir untersuchen nun, ob Gleich. 5 nicht möglicherweise einen mehr befriedigenden Ausdruck für die Sache geben sollte. Dieser Auffassung zufolge ist das Psychische nur an eine einzige bestimmte Art der Energie, an die P-Energie in engerem Sinne gebunden, die während der Arbeit des Gehirns neben vielen anderen Energieformen entsteht. Erstens leuchtet es ein, dafs sich von seiten der Physik gegen eine solche Annahme keine Einwürfe erheben lassen. Besondere Energieformen entstehen stets unter bestimmten Bedingungen; das Licht, die Elektrizität, die Röntgen-Strahlen erfordern zur Entstehung je ihre besonderen Verhältnisse. Es liegt daher nichts Sonderbares darin, dafs eine so komplizierte Maschine wie das Gehirn eine Energieform erzeugen kann, die wir einstweilen wenigstens nicht anderswoher kennen. Nur zwei Bedingungen mufs die Physik der Natur der Sache zufolge stellen: die hypothetische P-Energie mufs physische Eigenschaften besitzen, sich als physische Energie messen lassen, und sie mufs dem Gesetze von der Erhaltung der Energie unterworfen sein, so dafs durch Entstehung eines gewissen Quantums P-Energie stets ein äquivalentes Quantum andrer Energiearten verschwindet. Gegen diese Be-

dingungen scheint aber von metaphysischer Seite schwerlich etwas einzuwenden zu sein. Besitzt die *P*-Energie sowohl physische als psychische Eigenschaften, so ist diese Theorie zunächst als Monismus zu bezeichnen, das Körperliche und das Psychische werden dann nur Eigenschaften eines gemeinschaftlichen Begründenden. Übrigens sehen wir hier das Eigentümliche, dafs die Theorie, näher betrachtet, sowohl materialistisch als spiritualistisch heifsen kann. Materialistisch ist sie, insofern man annimmt, die *P*-Energie entstehe durch Transformation physischer Energie und werde, indem sie umgesetzt werde, wieder physische Energie (Wärme?). Die Theorie ist aber auch spiritualistisch, weil die *P*-Energie als spezielle, von allen anderen verschiedene Energieform, auch ihr besonderes Substrat haben mufs, das vom Äther und von anderen materiellen Substraten ebenso verschieden sein mufs wie das Psychische von der Elektrizität und von anderen Energien. Nur eins ist die Theorie nicht: sie ist kein Parallelismus. Es gibt nämlich durchaus keine Notwendigkeit, dafs jede Energietransformation im Gehirn eine Entladung von *P*-Energie bewirken sollte; im Gegenteil mufs man annehmen, dafs dies erst dann stattfindet, wenn das psychodynamische Potenzial eines Zentrums hinlänglich grofs geworden ist. Dies ist aber augenscheinlich kein Mangel der Theorie; eben der durchgängige Parallelismus erwies sich oben als nicht durchführbar. Überdies ist es eine Thatsache, dafs viele Hirnarbeit unbewufst vorgeht; über diese Thatsache kommt der Parallelismus nur dadurch hinweg, dafs er sich unbewufste psychische Erscheinungen denkt, was dem Denken doch stets eine Schwierigkeit darbietet, da wir das Psychische nur aus dem Bewufstsein kennen. Die Annahme, dafs das Psychische nur an eine bestimmte Energieform gebunden ist, scheint daher weder von seiten der Physik noch von seiten der Metaphysik Einsprüche antreffen zu können, da jeder wohlbegründete metaphysische Standpunkt sich dieselbe zu nutze führen kann.

Es ist natürlich nicht ohne Bedeutung, dafs die Theorie der *P*-Energie mehr oder weniger alle metaphysischen Standpunkte befriedigt; möglicherweise ist dies ein Anzeichen, dafs sie gerade das Berechtigte

jedes dieser Standpunkte in sich aufgenommen hat. Viel wesentlicher erscheint es mir jedoch, daſs diese spezielle Formulierung des Monismus — denn monistisch muſs die Theorie doch wohl zunächst genannt werden — den Vorzug vor dem üblichen monistischen Parallelismus besitzt. daſs sie die Realität des Physischen sowohl als die des Psychischen in vollem Maſse anerkennt. Sie ist nicht gezwungen, entweder das Physische auf eine Illusion oder das Psychische auf eine unwesentliche Rückseite der Veränderungen im Gehirn zu reduzieren. Indem das Psychische als eine selbständige, den anderen bekannten Energien nebengeordnete Energieform aufgefaſst wird, ist hiermit die Realität dieser anderen zugegeben. Dadurch wird aber die wesentliche Bedeutung des Psychischen nicht aufgehoben; im Gegenteil sieht man, daſs die *P*-Energie für die gesamte Arbeit des Gehirns von entscheidender Wichtigkeit ist. Ebenso wie die während der Thätigkeit der Nerven entwickelte Elektrizität zweifelsohne von wesentlicher Bedeutung ist, damit die Nerven überhaupt so arbeiten können, wie sie dies faktisch thun, ebenso ist die Entwickelung der *P*-Energie im Gehirn auch als ein für die Arbeit des Gehirns notwendiges Moment zu betrachten. Die *P*-Energie wird gerade das, was einen beseelten Organismus von einem unbeseelten unterscheidet. Denken wir uns die *P*-Energie aus dem Dasein entfernt, so erhalten wir nicht mehr ein »mit Bewuſstsein« arbeitendes Gehirn, wir erhalten dann ein bewuſstloses, schlummerndes Gehirn, und das macht doch ganz unzweifelhaft einen Unterschied. Da die *P*-Energie als physische Energie selbst zu den physischen Kausalreihen gehört, ist es unmittelbar einleuchtend, daſs dieses Glied sich nicht entfernt denken läſst, ohne daſs das Dasein als Totalität sich veränderte. Dem monistischen Parallelismus ist es dagegen ganz gleichgültig, ob das Psychische existiert oder nicht, weil der physische Kausalverlauf ein abgeschlossenes Ganzes ist, unabhängig davon, ob zugleich eine psychische Kausalreihe existiert. Durch die Theorie der *P*-Energie als besonderer Energieform gewinnen wir also, daſs die Bedeutung des Psychischen im Dasein verständlich wird.

Bisher erblickte man die wesentlichste Bedeutung

des Parallelismus in dessen Brauchbarkeit als Arbeitshypothese: derselbe gibt Anleitung, wo wir die Ursachen gegebener psychischer Erscheinungen zu suchen haben. Es bedarf wohl keines Nachweises, dafs hieran durch die spezielle Formulierung, welche der Monismus hier erhalten hat, nicht das geringste geändert wird. Da die *P*-Energie physische Energie ist, müssen für ihre Entstehung überall physische Ursachen gesucht werden. Aber auch an diesem Punkte bezeichnet die Theorie der *P*-Energie einen bedeutenden Fortschritt im Vergleich mit dem gewöhnlichen Parallelismus, weil sie auch quantitative Anweisungen gibt. Da das Psychische als Eigenschaft einer bestimmten Energieform aufgefafst wird, mufs es in quantitativer Beziehung durch die Menge der unter gegebenen Umständen entwickelten *P*-Energie bestimmt sein. An dieser Gröfse haben wir also ein Mafs für die psychischen Erscheinungen, und soweit es thunlich ist, die entwickelten Mengen der *P*-Energie oder damit proportionale Gröfsen zu messen, so weit wird es auch möglich sein, die Psychologie zu einer exakten, mit Quantitäten arbeitenden, mithin berechnenden Naturwissenschaft zu machen. Freilich ist im vorliegenden Werke nur ein sehr kleiner Schritt in dieser Richtung gemacht, ich hoffe indes, dafs das hierdurch Gewonnene sich als wertvoll genug erweisen wird, um andre Forscher anzuspornen, auf dem eingeschlagenen Wege weiterzugehen.

———

ANHANG.

Abhängigkeit der Pupillenweite von der Stärke des Lichtes. Wir sahen (S. 185—186), dafs die Stärke der Empfindung bestimmt wird durch die Gröfse des zentralen Energieumsatzes, an welchen die Empfindung gebunden ist. Die Unterscheidungsgesetze für die verschiedenen Sinnesgebiete geben folglich an, welches Verhältnis zwischen zwei Reizungen eines Sinnesorgans bestehen mufs, damit die hierdurch ausgelösten Energieumsätze einen ebenmerklichen Empfindungsunterschied erzeugen. In den Unterscheidungsgesetzen müssen deshalb Ausdrücke für alle Faktoren enthalten sein, welche Einflufs auf die Gröfse der durch simultane oder successive Reizungen desselben Sinnesorganes ausgelösten zentralen Energieumsätze erhalten. Beim Lichtsinne sind also nicht nur die photochemischen Wirkungen auf die Netzhaut zu berücksichtigen, durch die der Potenzialunterschied zwischen Peripherie und Zentrum bestimmt wird, sondern auch zugleich der gegenseitige Einflufs der gleichzeitig gereizten Stellen der Netzhaut aufeinander (der Kontrast) und der Einflufs des Stoffwechsels auf diese verschiedenen Vorgänge. Erst wenn man alle diese Faktoren bei der Berechnung mitnimmt, kann man einen genauen Ausdruck dafür erhalten, wie die Unterschiedsempfindlichkeit mit der objektiven Lichtstärke variiert. (Vgl. Gleich. 28 u. 29.) Es bleibt aber noch ein Umstand zurück, der bei der Berechnung nicht berücksichtigt wurde, obschon er beweislich einen sehr wesentlichen Einflufs auf die ins Auge eindringende Lichtmenge hat. Es ist hier von der Weite der Pupille die Rede.

Bei den S. 35 angeführten Messungen, auf die die Formel für die Unterschiedsempfindlichkeit ursprünglich begründet wurde, variierte die Beleuchtung der rotierenden Scheiben von 1 841 600 bis 15. Indem aber die objektive Beleuchtung von der gröfsten bis zur kleinsten der angegebenen Gröfsen abnimmt, erweitert sich die Pupille, so dafs ihr Areal bei der schwächsten Beleuchtung wenigstens zehnmal so grofs ist als bei der stärksten. Es gelangt mithin zehnmal so viel Licht ins Auge, als der Fall sein würde, wenn die Weite der Pupille unveränderlich wäre. Bei der objektiven Beleuchtung 15 empfängt die Netzhaut thatsächlich ebensoviel Licht, wie sie aufnehmen würde, wenn die Lichtstärke 150 wäre und die Pupille dieselbe Weite hätte, wie bei der stärksten Beleuchtung. Man begeht also einen sehr wesentlichen Fehler, wenn man mit den objektiven gemessenen Beleuchtungen rechnet, statt mit den Lichtmengen, welche die Netzhaut faktisch treffen, und welche verhältnismäfsig um so gröfser werden, je schwächer die Beleuchtung R wird, indem die Pupillenweite mit abnehmenden Werten des R allmählich zunimmt.

Lange war es mir ein Rätsel, weshalb in dem Unterscheidungsgesetze kein spezieller Ausdruck für die Weite der Pupille vorkam. Dafs dies nicht von Mefsfehlern herrührte, war einleuchtend, denn wenn die Pupillenweite bei den schwächsten Beleuchtungen etwa zehnmal so grofs wird wie bei den stärksten, so mufs das einen Einflufs auf die gemessenen Werte der kritischen Periode erhalten, der die möglichen Mefsfehler weit übersteigt. Es gab hier also ein noch ungelöstes Problem. Erst als die betreffenden Abschnitte des Buches im Drucke erschienen waren, fiel mir der natürliche und sehr einfache Ausweg bei, meine früheren Messungen nur mit dem Unterschied zu wiederholen, dafs ich die Scheiben durch eine cirkuläre, 3,6 mm im Durchschnitt haltende, dicht vor dem Auge angebrachte Öffnung betrachtete[1].

[1] In der That war der angewandte Apparat weit komplizierter, wir brauchen uns hier aber nicht auf die technischen Details einzulassen; der wesentliche Unterschied zwischen den neuen und den älteren Messungen besteht nur in der künstlichen Pupille.

Mittels der Anwendung einer derartigen künstlichen Pupille werden die Veränderungen der wirklichen Pupille eliminiert; nur das von der Scheibe durch die kleine Öffnung dringende Licht wird die Netzhaut treffen, und es kann nicht mehr Licht ins Auge gelangen, selbst wenn die Weite der natürlichen Pupille vielmal gröfser ist. Wir wollen nun sehen, zu welchen Ergebnissen wir unter diesen Verhältnissen kommen.

Es leuchtet erstens ein, dafs wir alle früheren Messungen der kritischen Periode nicht zu wiederholen brauchen. Gleich. 28 läfst sich nämlich, wie wir (S. 64) sahen, schreiben: $t = \tau \cdot B = K_1$. In der Gröfse B ist jetzt nur das Verhältnis R/r und r/R zwischen den beiden Reizen enthalten, diese Brüche können aber durch die Variationen der Pupillenweite keine Veränderung erleiden, weil beide Gröfsen, R und r, dann mit derselben Zahl multipliziert werden; ihr Verhältnis bleibt folglich unverändert. Es ist also nur die Gröfse τ, die von dem absoluten Werte des R abhängig ist, und die sich daher mit der Pupillenweite verändern kann. Wir brauchen also nur diejenigen Messungen, welche zu Werten für τ führen, mit künstlicher Pupille auszuführen. Das Ergebnis einer solchen Reihe von Messungen ist in der Tab. 35 wiedergegeben. In der obersten Reihe sind die benutzten Werte des R angeführt. Diese sind selbstverständlich durch dieselbe Einheit wie früher ausgedrückt, nur kommen hier nicht ganz dieselben Werte des R zur Anwendung. In der nächsten Reihe finden sich des Vergleiches wegen die den verschiedenen Werten des R entsprechenden Gröfsen des τ, aus Gleich. 13 berechnet; dies sind also die Zeitdauern, die für die natürliche, veränderliche Pupille gefunden werden. Die folgende Reihe enthält die für die künstliche Pupille gefundenen Werte von τ; diese sind τ_p bezeichnet. Vergleicht man dieselben mit den korrespondierenden τ, so sieht man, dafs τ_p durchweg gröfser ist, und zwar um so mehr, je kleiner R wird. Eben dies stand zu erwarten; denn wegen der künstlichen Pupille nimmt die ins Auge eintretende Lichtmenge ab, und je schwächer die Reizung der Netzhaut wird, um so gröfser wird die durch τ und τ_p ausgedrückte kritische Periode. Ferner sieht man, dafs τ_p ganz demselben Gesetze unterworfen

ist wie τ; für die Variationen des τ fanden wir früher den Ausdruck:

$$\tau = k - k_1 \cdot \log. R \quad .\ .\ .\ .\ \text{(Gleich. 12)},$$

oder nach Einsetzen der Konstanten:

$$\tau = 47.6 - 6.035 \log. R \quad .\ .\ .\ .\ \text{(Gleich. 13)}.$$

Für τ_p finden wir auf dieselbe Weise:

$$\tau_p = m - m_1 \cdot \log. R \quad .\ .\ .\ .\ \text{(Gleich. 61)}.$$

Hier ist $m = 55{,}2$ und $m_1 = 7{,}54$, also:

$$\tau_p = 55{,}2 - 7{,}54 \log. R \quad .\ .\ .\ .\ \text{(Gleich. 62)}.$$

Setzt man in Gleich. 62 nach und nach die verschiedenen Werte von R ein, so lassen sich die entsprechenden Werte τ_p berechnen; diese sind in der als »ber. τ_p« bezeichneten Reihe angeführt.

Tab. 35.

$R =$	1 356 030	313 600	70 200	18 018	3 873	1 107	215	37	12
τ ber.	10,6	14,4	18,3	21,9	25,9	29,2	33,5	38,2	41,2
τ_p	[12,5]	14,0	17,9	21,8	27,1	35,9	38,4	42,7	47,1
τ_p ber.	8,9	13,7	18,6	23,1	28,0	32,2	37,6	43,4	47,1

Hierdurch ist uns also die Lösung des oben erwähnten Rätsels gelungen. Wir sehen, dafs die Pupillenweite wirklich im Unterscheidungsgesetze vorkommt, dafs sie aber nur auf die Konstanten, nicht auf die mathematische Form des Gesetzes Einflufs erhält. Bei Anwendung der festen Pupille, welche die Schwankungen der Pupillenweite ausschliefst, finden wir für τ_p denselben mathematischen Ausdruck wie für τ, nur die Konstanten erhalten andere Werte. Die ganze, durch Anwendung der festen Pupille erzeugte Veränderung ist durch den Unterschied zwischen Gleich. 13 und Gleich. 62 gegeben. Also:

Das Unterscheidungsgesetz für Lichtempfindungen verändert seine mathematische Form nicht, wenn man die Schwankungen der

Pupille durch Anwendung einer künstlichen Pupille von konstanter Gröfse eliminiert; dieser Umstand erhält nur auf einzelne der in der Formel vorkommenden Konstanten Einflufs.

Verhält es sich nun damit richtig, dafs der Unterschied zwischen den Konstanten der Gleich. 13 und denen der Gleich. 62 nur von dem Ersatz der natürlichen variabeln Pupille durch eine künstliche konstante herrührt, so müssen wir im stande sein, aus diesen beiden Gleichungen die Gröfse der natürlichen Pupille für jeden aufgegebenen Wert des R zu berechnen. Eine allgemeine Formel hierfür können wir mittels folgender Betrachtung ableiten.

Nehmen wir an, dafs wir durch die künstliche Pupille eine schwach beleuchtete Scheibe erblicken, deren Rotationsgeschwindigkeit gerade gleich der kritischen Periode ist, für welche wir also an dem gefundenen τ_p ein Mafs besitzen. Denken wir uns nun die künstliche Pupille entfernt, so fällt also mehr Licht ins Auge, da die wirkliche Pupille bei der schwachen Beleuchtung gröfseres Areal hat als die künstliche. Die Entfernung der künstlichen Pupille erhält also ganz dieselbe Wirkung, als ob wir, unter Beibehaltung der konstanten Pupillenweite, die objektive Beleuchtung verstärkt hätten. Bei Zunahme der Beleuchtung nimmt die kritische Periode aber ab; statt des früheren τ_p erhalten wir mithin einen neuen Wert $\tau < \tau_p$. Es sei nun R_p die Gröfse, welche die Beleuchtung haben müfste, um bei konstanter Gröfse der Pupille den Wert τ zu geben. Diese Gröfse R_p können wir leicht berechnen, wenn wir in Gleich. 61 τ statt τ_p setzen. Man hat dann:

$$\tau = m - m_1 \cdot \log. R_p \quad . \ . \ . \ . \text{ (Gleich. 63).}$$

Da nun R_p diejenige Gröfse ist, welche man der Beleuchtung hätte geben müssen, um bei konstanter Pupille dieselbe kritische Periode zu finden, die man für die bewegliche Pupille bei der Beleuchtung R fand, mufs folglich der Bruch $v = R_p / R$ gerade angeben, wieviel Mal mehr Licht wegen der Entfernung der künstlichen Pupille ins Auge gedrungen ist. Oder mit anderen Worten: v gibt an, wieviel Mal das Areal der natür-

lichen Pupille bei der gegebenen Beleuchtung R gröſser ist als das Areal der künstlichen Pupille. Eben dieses Verhältnis wünschten wir zu erfahren. Wir können nun leicht allein mit Hilfe der Konstanten der Gleichungen 12 und 61 einen Ausdruck für v finden. Wir haben nämlich:

$\tau_p = m - m_1 \cdot \log. R$ . . . . (Gleich. 61) und

$\tau = m - m_1 \cdot \log. R_p$ . . . . (Gleich. 63), woraus folgt:

$$\tau_p - \tau = m_1 \cdot \log. \frac{R_p}{R}.$$

Ferner erhält man aus Gleich. 12 und Gleich. 61:

$\tau_p - \tau = m - k - (m_1 - k_1) \log. R$, also ist

$m_1 \log. \frac{R_p}{R} = m - k - (m_1 - k_1) \log. R$, woraus folgt:

$$\log. v = \log. \frac{R_p}{R} = \frac{m - k}{m_1} - \frac{m_1 - k_1}{m_1} \log. R.$$

Setzt man also $\frac{m - k}{m_1} = \log. M$ und $\frac{m_1 - k_1}{m_1} = n$, so wird

$$\log. v = \log. \frac{M}{R^n}, \text{ also: } v = \frac{M}{R^n}.$$

Da v das Verhältnis zwischen dem Areal der natürlichen Pupille bei der Beleuchtung R und dem konstanten Areale der künstlichen Pupille ist, so muſs $\sqrt{v}$ das Verhältnis der Durchmesser dieser Areale sein, und multipliziert man $\sqrt{v}$ mit dem Durchmesser p der künstlichen Pupille, so hat man als Ausdruck für den Durchmesser der natürlichen Pupille bei der Beleuchtung R:

$$D = p \sqrt{v} = p \sqrt{\frac{M}{R^n}} \text{ . . . . Gleich. 64).}$$

In den oben angegebenen Ausdrücken für M und n kommen nur die vier Konstanten aus den Gleichungen 13 und 62 vor; setzt man diese ein, so findet man: $M = 10{,}19$ und $n = 0{,}2$. Ferner haben wir bei der gegebenen Versuchsanordnung $p = 3{,}6$ mm. Folglich hat man als Ausdruck für die Pupillenweite der betreffenden Versuchsperson bei der Beleuchtung R:

$$v = \frac{10.19}{R^{0,2}} \text{ oder } D = 3{,}6 \sqrt{\frac{10.19}{R^{0,2}}}.$$

In der Tabelle 36 ist eine Übersicht über die hieraus berechneten Werte von v, $\sqrt{v}$ und D bei verschiedenen Gröfsen des R gegeben. Die in der Kolonne D angeführten Zahlen, die den Durchmesser der Pupille in mm angeben, stimmen sehr gut mit den Ergebnissen direkter Messung überein; nur sind die berechneten Werte sicherlich viel genauer, als die durch Messung gefundenen Zahlen. Als fernerer Beweis für die Richtigkeit der Berechnung mag folgendes angeführt werden. Aus Tab. 36 geht hervor, dafs bei $R = 1\,356\,030$ $v = 0{,}605$ ist; das Areal der natürlichen Pupille beträgt also nur wenig mehr als die Hälfte des Areals der künstlichen Pupille. Folglich mufs das gefundene τ_p ein wenig zu grofs werden, was auch aus Tab. 35 hervorgeht; deshalb ist dieser Wert bei der Berechnung von m und m_1 nicht mitgenommen.

Tab. 36.

R	v	$\sqrt{v}$	D
1 356 030	0,605	0,78	2,81
313 600	0,811	0,90	3,24
70 200	1,093	1,04	3,74
18 018	1,435	1,20	4,32
3 873	1,952	1,40	5,04
1 107	2,510	1,59	5,72
215	3,480	1,87	6,73
37	4,947	2,22	7,99
12	6,214	2,49	8,96

Es scheint also wohl keinen Zweifel erleiden zu können, dafs das Resultat, zu dem wir hier gelangten, richtig ist, und wir können daher feststellen:

Bei konstanter Akkommodation des Auges ist die Pupillenweite einer gewissen Potenz der Helligkeit des betrachteten Objekts umgekehrt proportional.

Pierer'sche Hofbuchdruckerei Stephan Geibel & Co. in Altenburg.

Pl. I.

184

18416

1841600

Pl. II.

2,2
2,1
2,0
1,9
1,8
1,7
1,6
1,5
1,4
1,3
1,2
1,1
1,0

10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

Pl. III.

Pl. IV.

A

XI B

XVI A

B

XIII C

XVIII A

XVIII B

Pl. V.

XVI B-E

XVII A-E

0 1 2 3 4 5

10 20 30 40 50 60 70 80

Pl. VI.

180 170 160 150 140 130 120 110 100 90 80 70 60 50 40 30 20 10 0

440 400 360 320 280 240 200 160 120 80 40

Pl. VII.

A

B

A 6 pr. Min.

B 80 pr. Min.

C 40 pr. Min.

A

20 pr. Min.

B

40 pr. Min.

Pl. XII.

A 30 pr. Min.

B 60 pr. Min.

C

8

A

B

60 pr. Min.

Pl. XV.

A

40 pr. Min.

B

20 pr. Min.

Pl. XVI.

A

B

A

40 pr. Min.

B

10 pr. Min.

Pl. XX.

A

80 pr. Min.

B

20 pr. Min.

B

D

A

C

A

B

Pl. XXIII.

A 30 pr. Min.

B 40 pr. Min.

C 12 pr. Min.

D 12 pr. Min.

Pl. XXV.

Pl. XXVI.

Pl. XXVIII.

A

B

C

D

Pl. XXX.